



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV VÝKONOVÉ ELEKTROTECHNIKY A ELEKTRONIKY

DEPARTMENT OF POWER ELECTRICAL AND ELECTRONIC ENGINEERING

TEPLOTNÍ VLASTNOSTI AUTOMOBILOVÝCH ZDROJŮ SVĚTLA - LED

THERMAL PROPERTIES OF AUTOMOTIVE LIGHT SOURCES - LED

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Jiří Bárta

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Marcel Janda, Ph.D.

BRNO 2018

Diplomová práce

Magisterský navazující studijní obor **Silnoproudá elektrotechnika a výkonová elektronika**

Ústav výkonové elektrotechniky a elektroniky

Student: Bc. Jiří Bárta

ID: 136499

Ročník: 2

Akademický rok: 2017/18

NÁZEV TÉMATU:

Teplotní vlastnosti automobilových zdrojů světla – LED

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

- 1 Vytvořte přehled používaných zdrojů světla v dnešních moderních světlometech.
- 2 Popište materiály používané v zdrojích světla.
- 3 Proveďte výpočet oteplení LED zdroje.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

- [1] Remek, B., Šťastný, J. Autoelektrika a autoelektronika. Praha: Nakl. T. Kalina. 1994
- [2] DVOŘÁČEK, V.: Světelné zdroje – obyčejné žárovky. Světlo, 4/2008.

Termín zadání: 5.2.2018

Termín odevzdání: 22.8.2018

Vedoucí práce: Ing. Marcel Janda, Ph.D.

Konzultant:

doc.Ing.Ondřej Vítek,Ph.D.
předseda oborové rady

Abstrakt

Cílem této diplomové práce je shrnout základní informace ohledně tepelných vlastností automobilových zdrojů světla se zaměřením především na LED diody. Dále vymodelovat LED diodu v Inventoru, provést simulaci Jouleových ztrát v Ansysu Workbench a simulaci oteplení LED diody z důvodu Jouleových ztrát v Ansysu Workbench Transient.

Abstract

The aim of this theses is to summarize the basic information about thermal properties of automobile lighting sources. The main topic is a LED diode. A model of a LED diode is going to be created in Inventor. A simulation of Joule's losses will be performed in Ansys Workbench Transient.

Klíčová slova

LED dioda, Autodesk Inventor, Ansys Workbench, světlomet, chlazení, bezdotykové měření, Ansys Workbench

Keywords

LED dioda, Autodesk Inventor, Ansys Workbench, headlamp, cooling, non – contact measurement, Ansys Workbench

Bibliografická citace

BÁRTA, J. Teplotní vlastnosti automobilových zdrojů světla - LED. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2018. 79 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Marcel Janda, Ph.D..

Prohlášení

Prohlašuji, že svou diplomovou práci na téma **Teplotní vlastnosti automobilových zdrojů světla - LED** jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této diplomové práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

V Brně dne

Podpis autora

Poděkování

Děkuji vedoucímu diplomové práce Ing. Marcel Janda Ph.D. za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé diplomové práce.

V Brně dne

Podpis autora



Obsah

SEZNAM OBRÁZKŮ.....	7
SEZNAM TABULEK	10
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	11
ÚVOD	12
1 DRUHY SVĚTELNÝCH ZDROJŮ	13
1.1 ZÁKLADNÍ ROZDĚLENÍ SVĚTELNÝCH ZDROJŮ	13
1.1.1 KLASICKÉ ŽÁROVKY	16
1.1.2 HALOGENOVÉ ŽÁROVKY	18
1.1.3 XENONOVÉ VÝBOJKY	20
1.1.4 BI-XENONOVÉ VÝBOJKY	22
1.1.5 LED DIODY	23
1.1.6 LASEROVÉ DIODY	28
1.2 ROZDĚLENÍ PODLE CHARAKTERU VYDÁVANÉHO SVĚTLA	29
1.2.1 DÁLKOVÁ A TLUMENÁ SVĚTLA	29
1.2.2 SVĚTLA DO MLHY	30
1.2.3 KONSTRUKČNÍ SVĚTLOMETY	30
1.2.4 SVÍTILNY	30
1.3 POROVNÁNÍ JEDNOTLIVÝCH ZDROJŮ SVĚTLA	32
2 TERMIKA ZDROJŮ SVĚTLA	33
2.1.1 KONDUKCE (VEDENÍ).....	33
2.1.2 KONVEKCE (PROUDĚNÍ).....	34
2.1.3 RADIACE (SÁLÁNÍ).....	34
3 ZJEDNODUŠENÝ MODEL LED DIODY V INVENTORU	36
3.1 VYTVOŘENÍ MODELU V AUTODESK INVENTOR PROFESSIONAL.....	39
4 VÝPOČET OTEPLENÍ LED POMOCÍ MKP	44
4.1 NASTAVENÍ V PROGRAMU WORKBENCH.....	44
4.2 VÝSLEDKY SIMULACÍ V PROGRAMU WORKBENCH	47
4.2.1 VÝSLEDKY SIMULACE JEDNÉ LED DIODY BEZ CHLADIČE.....	48
4.2.2 VÝSLEDKY SIMULACE JEDNÉ LED DIODY PŘI RŮZNÝCH MATERIÁLECH ČOČKY LED DIODY	51
4.2.3 VÝSLEDEK SIMULACE JEDNÉ LED DIODY PŘIPEVNĚNÉ NA CHLADIČI.....	56
4.2.4 VÝSLEDEK SIMULACE PĚTI LED DIOD, KTERÉ JSOU U SEBE NA CHLADIČI	58
4.2.5 PĚT LED DIOD DÁL OD SEBE NA CHLADIČI.....	61
ZÁVĚR.....	64
LITERATURA	65
PŘÍLOHY	67

SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obrázek 1 Vyzařovací úhel světelného zdroje^[7]</i>	14
<i>Obrázek 2 Index barevného podání^[15]</i>	15
<i>Obrázek 3 Teplota chromatičnosti^[9]</i>	15
<i>Obrázek 4 Závislost základních parametrů na napájecím napětí^[17]</i>	17
<i>Obrázek 5 Běžná biluxová žárovka R2^[16]</i>	18
<i>Obrázek 6 Halogenový cyklus^[19]</i>	19
<i>Obrázek 7 Halogenová žárovka H4^[20]</i>	19
<i>Obrázek 8 Rozptyl světla a) Halogenová žárovka b) Xenonová výbojka^[22]</i>	20
<i>Obrázek 9 Xenonová výbojka^[22]</i>	21
<i>Obrázek 10 Bi-xenonový reflektor^[22]</i>	22
<i>Obrázek 11 Struktura LED diody^[27]</i>	23
<i>Obrázek 12 Struktura řezu OLED^[25]</i>	24
<i>Obrázek 13 LED čip s chladičem^[22]</i>	25
<i>Obrázek 14 5mm červená LED dioda^[22]</i>	25
<i>Obrázek 15 LED dioda se dvěma anodami a katodami^[22]</i>	26
<i>Obrázek 16 High Power LED^[22]</i>	26
<i>Obrázek 17 Reflektorový systém LED^[22]</i>	27
<i>Obrázek 18 Projektorový systém LED^[22]</i>	27
<i>Obrázek 19 Optický systém s lisovanou čočkou^[22]</i>	28
<i>Obrázek 20 Konstrukce Laserové diody^[6]</i>	29
<i>Obrázek 21 Přehled nejčastěji používaných zdrojů světla v automobilu^[1]</i>	31
<i>Obrázek 22 Přenos tepla^[5]</i>	33
<i>Obrázek 23 Přenos tepla kondukcí^[11]</i>	33
<i>Obrázek 24 Nucené proudění^[12]</i>	34
<i>Obrázek 25 Samovolné proudění^[12]</i>	34
<i>Obrázek 26 Rozdíl mezi konvekcí a radiací^[8]</i>	35
<i>Obrázek 27 Zjednodušený model LED diody^[14]</i>	36
<i>Obrázek 28 LED dioda Z Power Z5 – M2^[26]</i>	36
<i>Obrázek 29 Pohled z boku na rozměry modelované LED diody Power Z5 – M2</i>	37
<i>Obrázek 30 Pohled shora na rozměry modelované LED diody Power Z5 – M2</i>	38
<i>Obrázek 31 Pohled ze spodní strany na rozměry modelované LED diody Power Z5 – M2</i>	38
<i>Obrázek 32 Izolační deska LED diody Power Z5 – M2</i>	39

<i>Obrázek 33 Měděná destička ke katodě LED diody Power Z5 – M2.....</i>	<i>39</i>
<i>Obrázek 34 Měděná destička k anodě LED diody Power Z5 – M2</i>	<i>40</i>
<i>Obrázek 35 Měděný drátek spojující měděnou destičku k anodě a polovodič typu P.....</i>	<i>40</i>
<i>Obrázek 36 Kontakt pro anodu a katodu</i>	<i>40</i>
<i>Obrázek 37 Polovodič typu P.....</i>	<i>41</i>
<i>Obrázek 38 Polovodič typu N.....</i>	<i>41</i>
<i>Obrázek 39 Čočka LED diody Power Z5 – M2.....</i>	<i>41</i>
<i>Obrázek 40 Zjednodušený model LED diody Power Z5 – M2</i>	<i>42</i>
<i>Obrázek 41 Zjednodušený model LED diody Power Z5 – M2 (2)</i>	<i>42</i>
<i>Obrázek 42 Zjednodušený model LED diody Power Z5 – M2 (3)</i>	<i>42</i>
<i>Obrázek 43 LED dioda Power Z5 – M2 na chladiči.....</i>	<i>43</i>
<i>Obrázek 44 5x LED dioda Power Z5 – M2 u sebe na chladiči.....</i>	<i>43</i>
<i>Obrázek 45 5x LED dioda Power Z5 - M2 dál od sebe na chladiči.....</i>	<i>43</i>
<i>Obrázek 46 Vývojové prostředí programu Workbench.....</i>	<i>44</i>
<i>Obrázek 47 Nastavení vzdušných boxů v Modelu pro LED diody</i>	<i>45</i>
<i>Obrázek 48 Vytvořené vzdušné boxy.....</i>	<i>46</i>
<i>Obrázek 49 Nastavení vstupních parametrů (teplota okolí, vstupní příkon)</i>	<i>47</i>
<i>Obrázek 50 Graf oteplení LED diody při různém příkonu, teplota okolí 22°C.....</i>	<i>48</i>
<i>Obrázek 51 Graf oteplení LED diody při různém příkonu, teplota okolí 85°C.....</i>	<i>48</i>
<i>Obrázek 52 Graf oteplení LED diody při příkonu 3 W</i>	<i>49</i>
<i>Obrázek 53 Graf oteplení LED diody při příkonu 5 W</i>	<i>49</i>
<i>Obrázek 54 Graf oteplení LED diody při příkonu 7 W</i>	<i>49</i>
<i>Obrázek 55 Graf oteplení LED diody.....</i>	<i>50</i>
<i>Obrázek 56 Výsledné oteplení jedné LED diody (5 W, 85°C).....</i>	<i>50</i>
<i>Obrázek 57 Graf oteplení LED diody v závislosti na materiálu čočky při teplotě okolí 22°C.....</i>	<i>51</i>
<i>Obrázek 58 Graf oteplení LED diody v závislosti na materiálu čočky při teplotě okolí 85°C.....</i>	<i>52</i>
<i>Obrázek 59 Graf oteplení LED diody v závislosti na materiálu čočky při teplotě okolí 22°C a 85°C.....</i>	<i>52</i>
<i>Obrázek 60 Teplotní síť při použitém materiálu čočky – plexisklo (uvnitř LED diody)</i>	<i>53</i>
<i>Obrázek 61 Teplotní síť při použitém materiálu čočky – plexisklo</i>	<i>53</i>
<i>Obrázek 62 Teplotní síť při použitém materiálu čočky – sklo (uvnitř LED diody)</i>	<i>53</i>
<i>Obrázek 63 Teplotní síť při použitém materiálu čočky – sklo.....</i>	<i>54</i>
<i>Obrázek 64 Teplotní síť při použitém materiálu čočky – sklo 2 (uvnitř LED diody)</i>	<i>54</i>
<i>Obrázek 65 Teplotní síť při použitém materiálu čočky – sklo 2.....</i>	<i>54</i>

<i>Obrázek 66 Teplotní síť při použití materiálu čočky – křemík (uvnitř LED diody).....</i>	<i>55</i>
<i>Obrázek 67 Teplotní síť při použití materiálu čočky – křemík</i>	<i>55</i>
<i>Obrázek 68 Graf oteplení LED diody připevněné na chladiči při různém příkonu, teplota okolí 22°C.....</i>	<i>56</i>
<i>Obrázek 69 Graf oteplení LED diody připevněné na chladiči při různém příkonu, teplota okolí 85°C.....</i>	<i>56</i>
<i>Obrázek 70 Graf oteplení LED diody na chladiči při příkonu 3 W</i>	<i>56</i>
<i>Obrázek 71 Graf oteplení LED diody na chladiči při příkonu 5 W</i>	<i>57</i>
<i>Obrázek 72 Graf oteplení LED diody na chladiči při příkonu 7 W</i>	<i>57</i>
<i>Obrázek 73 Graf oteplení LED diody na chladiči.....</i>	<i>57</i>
<i>Obrázek 74 LED dioda Power Z5 - M2 3W s chladičem, teplota okolí 22°C.....</i>	<i>58</i>
<i>Obrázek 75 Graf oteplení 5× LED diody připevněné na chladiči (světelné paprsky se překrývají) při různém příkonu, teplota okolí 22°C.....</i>	<i>58</i>
<i>Obrázek 76 Graf oteplení 5× LED diody na chladiči (světelné paprsky se překrývají) při různém příkonu, teplota okolí 85°C</i>	<i>59</i>
<i>Obrázek 77 Graf oteplení 5× LED diody na chladiči (světelné paprsky se překrývají) při příkonu 3 W.....</i>	<i>59</i>
<i>Obrázek 78 Graf oteplení 5× LED diody na chladiči (světelné paprsky se překrývají) při příkonu 5 W.....</i>	<i>59</i>
<i>Obrázek 79 Graf oteplení 5× LED diody na chladiči (světelné paprsky se překrývají) při příkonu 7 W.....</i>	<i>60</i>
<i>Obrázek 80 Graf oteplení 5× LED diody na chladiči (světelné paprsky se překrývají)</i>	<i>60</i>
<i>Obrázek 81 5× LED dioda Power Z5 – M2 3 W u sebe s chladičem.....</i>	<i>60</i>
<i>Obrázek 82 Graf oteplení 5× LED diody připevněné na chladiči (světelné paprsky se nepřekrývají) při různém příkonu, teplota okolí 22°C</i>	<i>61</i>
<i>Obrázek 83 Graf oteplení 5× LED diody připevněné na chladiči (světelné paprsky se nepřekrývají) při různém příkonu, teplota okolí 85°C</i>	<i>61</i>
<i>Obrázek 84 Graf oteplení 5× LED diody na chladiči (světelné paprsky se nepřekrývají) při příkonu 3 W</i>	<i>62</i>
<i>Obrázek 85 Graf oteplení 5× LED diody na chladiči (světelné paprsky se nepřekrývají) při příkonu 5 W</i>	<i>62</i>
<i>Obrázek 86 Graf oteplení 5× LED diody na chladiči (světelné paprsky se nepřekrývají) při příkonu 7 W</i>	<i>62</i>
<i>Obrázek 87 Graf oteplení 5× LED diody na chladiči (světelné paprsky se nepřekrývají)</i>	<i>63</i>
<i>Obrázek 88 5× LED dioda Power Z5 – M2 3 W od sebe s chladičem.....</i>	<i>63</i>

SEZNAM TABULEK

<i>Tabulka 1 Různé materiály PN přechodu a jejich vlastnosti ^[22]</i>	26
<i>Tabulka 2 Porovnání zdrojů světla v automobilu</i>	32
<i>Tabulka 3 Parametry LED diody Z Power Z5 – M2 ^[26]</i>	37
<i>Tabulka 4 Naměřené hodnoty pro příkon 3 W a 5 W a teplotu okolí 22°C</i>	67
<i>Tabulka 5 Naměřené hodnoty pro příkon 3 W a 5 W a teplotu okolí 85°C</i>	68
<i>Tabulka 6 Naměřené hodnoty pro příkon 7 W a teplotu okolí 22°C a 85°C</i>	69
<i>Tabulka 7 Naměřené hodnoty pro různé materiály (křemík, sklo, plexisklo) čočky LED diody Power Z5 – M2 při příkonu 3 W a teplotě okolí 22°C</i>	70
<i>Tabulka 8 Naměřené hodnoty pro různé materiály (sklo, plexisklo) čočky LED diody</i>	71
<i>Tabulka 9 Naměřené hodnoty pro různé materiály (sklo, křemík) čočky LED diody</i>	72
<i>Tabulka 10 Naměřené hodnoty LED diody Power Z5 – M2 připevněné na chladiči</i>	73
<i>Tabulka 11 Naměřené hodnoty LED diody Power Z5 – M2 připevněné na chladiči</i>	74
<i>Tabulka 12 Naměřené hodnoty 5 × LED diody Power Z5 – M2 na chladiči (světelné paprsky se překrývají – LED diody jsou blízko u sebe)</i>	75
<i>Tabulka 13 Naměřené hodnoty 5 × LED diody Power Z5 – M2 na chladiči (světelné paprsky se překrývají – LED diody jsou blízko u sebe)</i>	75
<i>Tabulka 14 Naměřené hodnoty 5 × LED diody Power Z5 – M2 na chladiči (světelné paprsky se nepřekrývají – LED diody jsou dál od sebe)</i>	76
<i>Tabulka 15 16 Naměřené hodnoty 5 × LED diody Power Z5 – M2 na chladiči (světelné paprsky se nepřekrývají – LED diody jsou dál od sebe)</i>	77

SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK

DRL = Daytime Running Lamp - světla pro denní svícení

AFS = Adaptive Frontlight System – systém předního osvětlení

LED = Light emitting diode – světlo vyzařující dioda

HID = High intensity discharge – vysokotlaká výbojka

CRI = Color Rendering Index – index barevného podání

$T_{j\max}$ = maximální teplota PN přechodu LED diody

Φ = Světelný tok

I = Svítivost zdroje

L = Jas

E = Osvětlení

φ – úhel mezi směrem pozorování a kolmicí ke svítící ploše

S – svítící plocha

ÚVOD

Moderní světelná technika hraje v současné době nezastupitelnou roli v rychle se rozvíjejícím automobilovém průmyslu. Vývoj světelné techniky můžeme sledovat již od začátku 19. století, kdy si lidé zhotovovali primitivní svítidla, jako např. olejové lampy. Tato nejjednodušší svítidla byla nezbytným vývojovým stupněm na cestě k dokonalejším technologiím, jako jsou např. laserové světlomety. V dnešní době jsou již světlomety konstrukčně složitá a sofistikovaná zařízení, která musí splňovat mnoho bezpečnostních norem. Parametry světelných zařízení v nemotorových i motorových vozidlech jsou přesně dány základní českou státní normou Osvětlení vozidel ČSN 30 4302.

S vývojem světelných zdrojů je nutné se zabývat problematikou tepelných vlastností automobilových zdrojů světla. Zjištění tepelných ztrát hraje velkou roli. Díky tomuto můžeme co nejlépe navrhnout chlazení (a to hlavně u LED diod). Velké zahřívání vede ke zkrácení životnosti. Na což jsou velmi citlivé právě LED zdroje. Z těchto zjištěných informací se proto v teoretické části práce nejprve podíváme na přehled nejznámějších typů světél a poté si je popíšeme. V části praktické se pak budeme zabývat již konkrétní analýzou tepelných vlastností zvoleného zdroje světla, a to LED diody.

1 DRUHY SVĚTELNÝCH ZDROJŮ

Světlo je jeden z druhů elektromagnetického záření. Je to záření, které je schopné zaznamenat lidským okem.

Elektrická světelná zařízení byla jedna z prvních instalovaná na automobilových vozidlech. Využití elektrických světél v automobilovém průmyslu má nesporné výhody, co se týče pohodlnosti obsluhy. Nejdůležitější kladnou vlastností elektrického osvětlení je ale zvýšení bezpečnosti provozu. Na vozidlech rozeznáváme osvětlení podle umístění. Jako základní rozdělení můžeme vzít osvětlení vnější a vnitřní. Dále můžeme rozlišit podle plnění účelu na zlepšení viditelnosti a informačního charakteru.

1.1 Základní rozdělení světelných zdrojů

- **Klasické žárovky** – vakuové
– plněné plynem – halogenové, klasické
- **Výbojky** – vysokotlaké – sodíkové, xenonové, rtuťové, halogenidové, plazmové světelné zdroje
– nízkotlaké – indukční výbojky, kompaktní, sodíkové, zářivky
- **LED** – s luminoforem, RGB

V dnešní době se mezi nejvíce používané světelné zdroje v automobilovém průmyslu řadí halogenové žárovky, xenonové výbojky a momentálně čím dál více LED diody a laserové diody. V současnosti mají diody 10x až 15x lepší účinnost než klasické žárovky.^[1]

Pro hodnocení vlastností světelných zařízení se používají následující veličiny, pojmy a jednotky:

- **Světelný tok (Φ)**
 - množství světelné energie vydané zdrojem světla za sekundu, jednotka je lumen [lm]. Měrná světelná účinnost je přepočítaný světelného toku na jeden watt. Jednotka je lumen na watt [lmW⁻¹]
- **Svítivost zdroje (I)**
 - hustota světelné energie vyzařované do určitého směru, jednotka kandela (cd)

Mezi světelným tokem a svítivostí platí vztah:

$$I = \frac{d\Phi}{d\phi} \quad [1.1]$$

Φ – prostorový úhel – jednotka je steradián

- **Jas (L)**
 - udává poměrné rozložení svítivosti na povrchu zdroje, jednotka nit (nt), platí vztah:

$$L = \frac{dI}{dS} \cdot \cos\varphi \quad [1.2.]$$

S – svítící plocha

φ – úhel mezi směrem pozorování a kolmicí ke svítící ploše ^[1]

- Osvětlení (E)

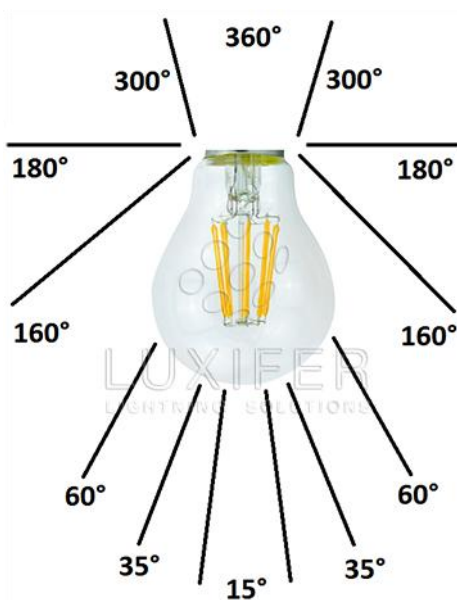
- hustota světelného toku dopadajícího na určitou plochu, jednotka lux, platí vztah:

$$E = \frac{dF}{dS} \quad [1.3]$$

- V praxi bývá zvykem posuzovat výkon či spíše svítivost světelného zařízení podle jeho elektrického příkonu ve wattech. ^[1]

- Vyzařovací úhel

- Ze zdroje je vyzařované světlo emitováno pod různým úhlem. Tento vyzařovací úhel dává informaci o rozložení vyzařovaného světla.
- $30^\circ - 60^\circ$ - Bodové světlo pro osvětlení konkrétních předmětů. Jedná se o bodová světla s malým kuželem světla.
- $90^\circ - 120^\circ$ - Bodové světlo pro osvětlení větších předmětů. Jedná se o bodová světla s větším kuželem světla.
- $160^\circ - 180^\circ$ - Světlo pro osvětlení velkých prostor.
- $300^\circ - 360^\circ$ - Jedná se o všesměrový zdroj světla. Svítí všemi směry. ^[7]



Obrázek 1 Vyzařovací úhel světelného zdroje ^[7]

- Index barevného podání

- Porovnává věrnost barevného vjemu vzniklého zdrojem světelného záření a barevného vjemu vzniklého na světle od Slunce.
- Zkratka je CRI

- Hodnota se udává v rozmezí od 0 až 100
- Hodnota 0 – nelze rozeznat podání barev
- Hodnota 100 – dokonalé rozeznání podání barev



Obrázek 2 Index barevného podání^[15]

- Maximální teplota

- Udává maximální možnou teplotu na PN přechodu.
- Limitována použitým materiálem polovodičů a podložky.
- Při překročení maximální teploty dochází ke ztrátě světelného výkonu LED a také velmi rychle klesá její životnost.
- Bývá okolo 125°C.

- Barva světla

- Bývá popsána teplotou chromatičnosti. LED diody disponují se všemi spektry barevné teploty.



Obrázek 3 Teplota chromatičnosti^[9]

- Maximální teplota

- $T_{j \max}$ značí maximální teplotu na přechodu LED diody, která je omezena použitým materiálem polovodičů a podložky. Pokud se tato teplota překročí, ztrácí LED dioda na světelném výkonu a rapidně klesá její životnost. Tato teplota se pohybuje okolo 125 °C.

- Životnost

- Definuje počet provozních hodin za určitých podmínek, než dojde k poklesu výkonu pod danou hranici. Životností se nejčastěji rozumí pokles svítivosti v lumenech pod 70 % svítivosti původní. Protože LED diody nejsou citlivé na vypínání a zapínání, můžeme při správném provozování přesáhnout jejich životnost.

Žárovky pro vozidla pracují za velmi nepříznivých provozních podmínek, přičemž je kladen důraz na stálost geometrické polohy vlákna vůči upevňovací objímce žárovky.

1.1.1 Klasické žárovky

Klasická žárovka, i přes velký rozmach LED technologie, stále nalézá své uplatnění v automobilovém průmyslu. Žárovku můžeme charakterizovat jako zařízení, které využívá elektrického proudu a zvláště pak jeho tepelných účinků k emisi světla.

Každý vodič má nějaký elektrický odpor. Ten způsobuje, že se vodič zahřívá, pokud jím prochází elektrický proud. Takto zahřátá tělesa svítí a jejich teplota pak ovlivňuje barvu světla. Teplota červeně zářících těles je nejnižší, přibližně 600°C.

Části žárovky můžeme popsat následovně: skleněná baňka, objímka a wolframové vlákno. Wolframová vlákna jsou velmi slabá, mohou být dokonce slabší než lidský vlas. V jedné žárovce je toto vlákno o délce asi tři čtvrtiny metru stočeno v miniaturních spirálkách. Skleněná baňka žárovky je naplněná vzácnými plyny. Je to z toho důvodu, že wolframové vlákno se při průchodu proudu dokáže rozžhavit až na teplotu okolo 2 500°C. Odpor wolframového vlákna je totiž řádově 100 ohmů. Díky tomu, že v žárovce není kyslík, vlákno v žárovce neshoří. Konstrukce žárovky je zobrazena na obr. 5.

Od používání tohoto typu světla se však již v dnešní době upouští. Je totiž velice neekonomické. Klasické žárovky přemění až 96 % elektrické energie na teplo a pouhých 4% na samotné svícení. Výhodou ale zůstává podobnost světla žárovky dennímu světlu. Svícení žárovkami je tak šetrné k našemu zraku. Mezi další výhody použití klasické žárovky patří především její nízká pořizovací cena. Dále také možnost stmívání a bezpochyby také výhoda okamžitého zapnutí.

Životnost žárovky se obvykle udává 1 000 hodin, přičemž tato veličina je závislá na napájecím napětí. Měrný výkon žárovky se pohybuje kolem 13 lm/W.

U žárovek nad 25 W se jako náplň obvykle využívá argon s příměsí dusíku či krypton taktéž s příměsí dusíku. Dusík zabraňuje vzniku výboje mezi závity vlákna. Díky příměsí inertního plynu dochází k nižšímu odpařování vlákna, můžeme zvýšit teplotu a tím se nám zvedne měrný výkon, při zachování stejné životnosti. Tento inertní plyn omezuje černání baňky a zlepšuje stabilitu světelného toku. Pro dosažení co nejdelší životnosti je potřeba žárovky plnit na nejvyšší možný tlak, pokud možno blížíci se okolní atmosféře.

V automobilovém průmyslu se klasické žárovky využívají jako DRL - světla pro denní svícení (dnes se už spíše přechází na LED světla), zadní skupinová světla a světla směrová.

Při svícení klasickými žárovkami dochází ke žhavení wolframového vlákna ve skleněné baňce, která je upevněná v příslušné patci podle typu žárovky. Původně se žárovky neplnily plynem, ale vytvářelo se v nich vakuum, které mělo zajistit nižší emisi materiálu vlákna. Dnes již

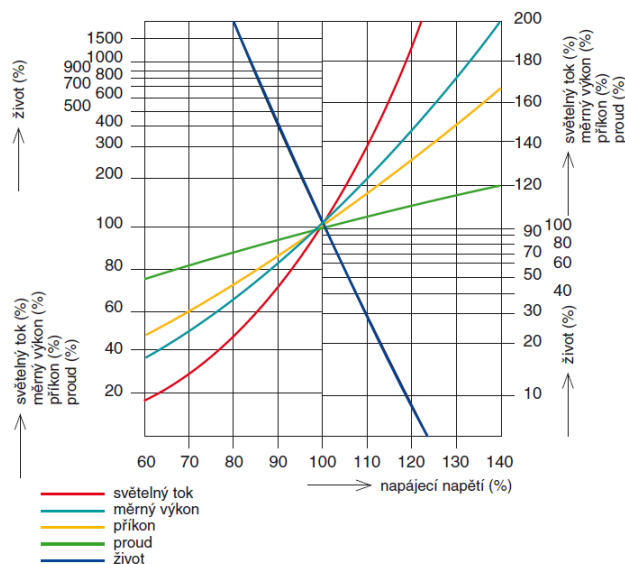
jsou žárovky plněny směsí argonu a dusíku nebo kryptonem. Na obrázku 2 máme žárovku typu R2. Tuto žárovku tvoří dvě vlákna – jedno pro dálková a druhé pro tlumená světla.^[2]

Výhody:

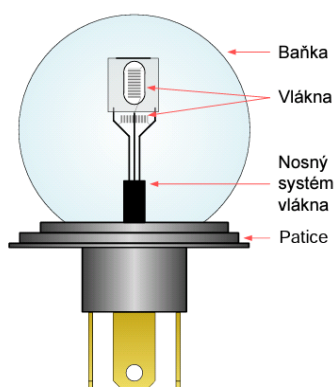
- Jednoduchá konstrukce.
- Nízká hmotnost.
- Spojité spektrum vyzařovaného světla.
- Teplota chromatičnosti 2700 až 2900 K.
- Věrné podání barev osvětlovaných předmětů $R_a = 100$.
- Možnost konstruovat žárovky pro různá napětí.
- Nízká cena.
- Možnost regulace světelného toku.

Nevýhody:

- Zásadním nedostatkem všech klasických žárovek je velmi malý měrný výkon.
- Nízká životnost (1000 h).
- Pokles světelného toku v průběhu života.
- Přetržení vlákna z důvodu otřesu.
- Závislost parametrů žárovky na napájecím napětí (životnost).



Obrázek 4 Závislost základních parametrů na napájecím napětí^[17]



Obrázek 5 Běžná biluxová žárovka R2 ^[16]

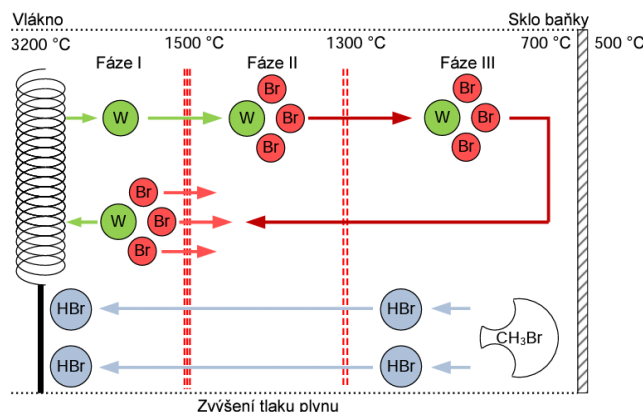
1.1.2 Halogenové žárovky

Výhodou halogenových žárovek oproti žárovkám klasickým je vyšší svítivost i delší životnost. Konstrukce halogenových žárovek umožnila posun světelného toku za hranici 1 000 lm. Například žárovka H4 má kolem 1 000 lm pro tlumené a 1 600 lm pro dálkové svícení. Hodnoty ostatních žárovek se pohybují kolem 1 500 lm. V porovnání s výbojkami typu D1 plněnými xenonem typu je to asi poloviční hodnota. ^[2]

Halogenové žárovky bývají plněny směsí plynu s halovými prvky. V případě motorových vozidel především metylenbromidem a halovým prvkem bromem.

Mezi nevýhody použití halogenových žárovek patří jejich baňky. Tyto baňky jsou tvořeny křemičitým sklem, které se může snadno poškodit při znečištění, např. pouhým dotykem prstu. Proto se doporučuje vyhnout se přímému dotyku skleněné baňky. Halogenové žárovky jsou také velmi citlivé na kolísání pracovního napětí. I malý pokles tohoto napětí způsobí výrazný pokles svítivosti. Naopak vyšší hodnoty napětí rapidně snižují životnost halogenové žárovky. Negativní vliv na správné fungování má také dlouhodobý vliv blízkého zdroje vibrací na žárovku. Tím vzniká takzvaný únavový lom vlákna.

Delší životnost halogenové žárovky při zachování vyšší svítivosti nám může zajistit tzv. halogenový cyklus – viz obr. 2. Mezi jednotlivými zónami v prostoru baňky dochází k transportním procesům, které zajišťují, že se odpařené atomy wolframu na konci tohoto procesu opět vyloučí zpět. Na obrázku vidíme, že ve fázi I se při teplotě 3 200°C z wolframového vlákna odpařují atomy wolframu. Tyto atomy vstupují do fáze II, kde se při teplotě 1 400°C sloučí s uvolňujícím se bromem v plyn, bromid wolframu. Přes fázi III doputuje wolframbromid ke žhavené spirále, kde se z něj vyloučí wolfram. ^[18]



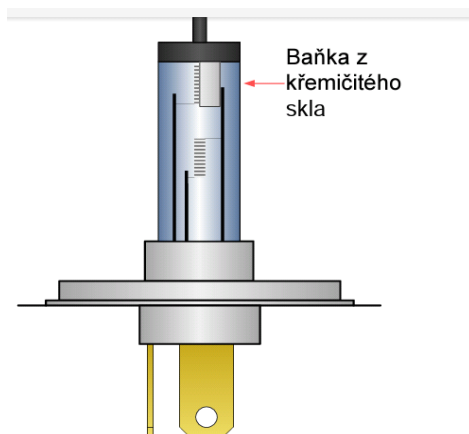
Obrázek 6 Halogenový cyklus ^[19]

Výše popsáný cyklus dokáže u halogenových žárovek při zvýšení světelného toku zvýšit životnost až o 30 % v porovnání s klasickou žárovkou.

Teplota světla u halogenových žárovek se pohybuje cca kolem 3 200 K.

V automobilovém průmyslu se pro označování různých typů halogenových žárovek používá následující klasifikace homologovaných žárovek:

- H1: dálková i tlumená světla do moderních, dělených světlometů.
- H3: mlhové světlometry.
- H4: dvouvláknové žárovky – viz obr. 3.
- H7: tlumená i dálková světla do moderních, dělených světlometů.



Obrázek 7 Halogenová žárovka H4 ^[20]

Rozlišujeme dva základní typy žárovek pro všeobecné osvětlení:

- Pro síťové napětí – příkon: 60-2000 W, měrný výkon: 13-25 lm/W.
- Pro nízké napětí (12 V) – příkon: 5-75 W, měrný výkon: 11-19 lm/W, např. halogenová žárovka typu H4.

Halogenové projektorové světlometry

Pro přední světla osobních automobilů se začala využívat nová technologie tzv. halogenových projektorových světlometů. Jde o typ světlometu, který využívá projektorové čočky místo klasických parabol pro rozptyl světla. Používají se v nich standardní halogenové

žárovky H7. Ve srovnání s xenonovými světly, která také využívají projektorové čočky, mají tak nižší cenu. Další výhodou tohoto typu světlometu je vysoký výkon a zástavbová nenáročnost.

Vlastností halogenového světlometu

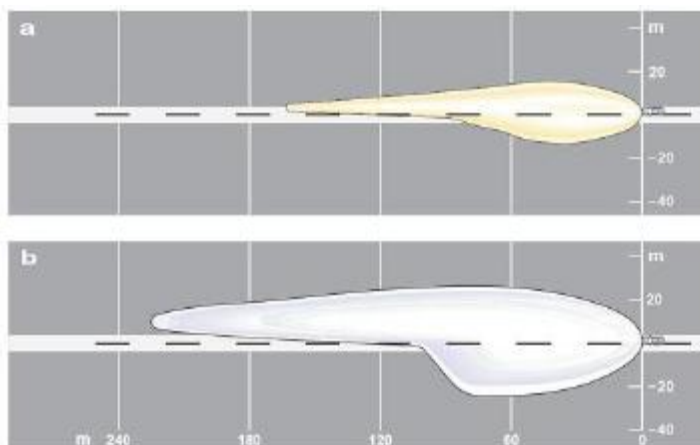
Halogenové žárovky ke svému provozu vyžadují příkon 55-65 W. Jejich světelný tok se pohybuje mezi 1 500 až 2 000 lm. Měrný světelný tok je pak 26 lm/W. Teplota chromatičnosti je u halogenových žárovek 2 900-3 100 K. Životnost se obvykle udává kolem 400-550 hodin. Značení halogenových žárovek je H1, H3, H4 a H7.

Velká výhoda v použití halogenových žárovek spočívá bezpochyby v jejich nízké ceně (oproti klasické žárovce nejsou zas tak levné). Méně technicky zdatný uživatel také jistě ocení jejich snadnou výměnu, avšak je třeba dávat pozor na mastné ruce. Halogenové žárovky mají jednoduchou konstrukci. Jejich použití je velice univerzální – využívají se ve světlech dálkových, potkávacích, mlhových i parkovacích.

Přes všechny nesporné výhody používání halogenových světlometů plynou i některé nevýhody. V porovnání se získaným světelným tokem je potřeba počítat s poměrně vysokou energetickou náročností. Halogenové světlomety se dále vyznačují kratší životností než např. LED dioda, a tak se uživatel automobilu nevyhne jejich několikanásobné výměně v průběhu užívání automobilu. Tento typ světlometu navíc zvyšuje únavu očí pozorovatele a zhoršuje viditelnost, protože nedosahuje barevných teplot denního světla. ^[21]

1.1.3 Xenonové výbojky

Výbojky tvoří druhou velkou skupinu zdrojů světelného záření. Světlo však neprodukují žárem, ale elektrickým výbojem mezi dvěma elektrodami, které jsou uloženy ve skleněné trubici. Trubice bývají naplněny parami kovů (např. rtuť) nebo ředěnými vzácnými plyny (např. xenon).



Obrázek 8 Rozptyl světla a) Halogenová žárovka b) Xenonová výbojka ^[22]

Elektrody jsou žhaveny budícím proudem. Tímto způsobem uvolněné elektrony vytvoří kolem elektrod výraznou ionizaci plynů. Výsledkem je barevné monochromatické světlo, které vydává rozzářený plyn.

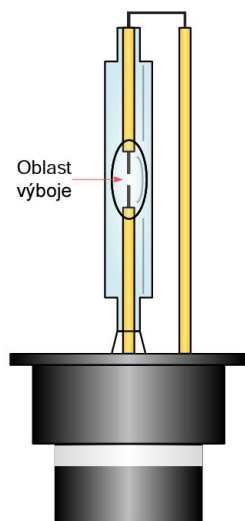
Výboj je vybuzen vysokonapětovým impulzem. V automobilovém průmyslu se využívá především xenonových výbojek, které jsou plněné xenonem s příměsí metalických solí. Elektrody jsou vyrobené z wolframu a jsou zatavené v trubičce z křemičitého skla v rozestupu 4,2 mm.

Výbojky řadíme mezi vysokotlaké zdroje světla. Pracovní tlak se může vyšplhat až na 70 barů, přičemž tlak v trubici za studena bývá asi 7 barů.

V prvotní fázi probíhá výboj v parách xenonu. Jakmile začne narůstat teplota, zvyšuje se koncentrace halogenidů ve výboji. Při pracovní teplotě hořáku okolo 700°C dochází ke štěpení halogenidů. Vznikají atomy halogenu a atomy příslušného kovu, které se pak vybudí a září. Výboj se ustálí během pár vteřin.

Takto vznikne uzavřený cyklus, který tvoří základ pro vznik účinného světelného zdroje. Má požadované spektrální složení záření a výbornou životnost. Tepelné spektrum xenonové výbojky se blíží spektru denního světla, přičemž barevná teplota světla je u xenonových výbojek kolem 4 100 K.

Zdrojem světla u xenonových světlometů jsou výbojky. Jejich výhodami jsou dlouhá životnost, velký světelný výkon a kompaktní rozměry.



Obrázek 9 Xenonová výbojka ^[22]

Světlo ve výbojkách vzniká elektrickým výbojem mezi dvěma elektrodami, které jsou upevněné v baňce. Oblast, kde vzniká výboj, má rozměry cca 5 mm. Baňka je plněná inertním plynem, jehož složení ovlivňuje výslednou barvu světla. V případě těchto výbojek je použit plyn xenon. Barevné spektrum takové výbojky se přibližuje spektru denního světla. Pro bližší představu si uvedeme porovnání teplot chromatičnosti denního světla, světla xenonové výbojky a světla halogenové žárovky:

- **Denní světlo:** 5 200 K
- **Xenonové výbojky:** 4 100 K
- **Halogenové žárovky:** 3 200 K

Zapalovací modul vyprodukuje vysokonapěťový impuls o několika tisících voltů a tím se zapálí elektrický oblouk. Xenon navíc podpoří rychlý náběh elektrické výbojky do jejího plného výkonu. Tak výbojka dokáže splnit náročné podmínky automobilového průmyslu.

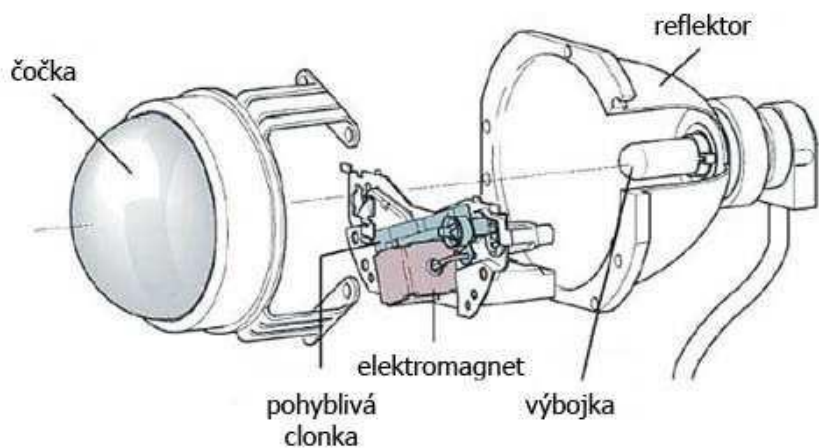
Xenonové světlomety mají daleko vyšší životnost než halogenové žárovky, a to až 6x. Životnost „xenonů“ se totiž pohybuje kolem 3 000 hodin. Přitom vydají asi $2,5\times$ více světla než „halogeny“, a to při stejném příkonu. Mají větší dosvit světelného kuželu a jejich světlo je navíc v blízkosti vozu rozptýlenější.

Nahrazovat xenonovou výbojkou běžnou halogenovou žárovku není moc výhodné. Halogenové žárovky totiž vytvářejí jiné ohnisko než xenony. Jejich použití navíc vyžaduje instalaci přídavného zařízení, tzv. předřadníku. Pro snížení oslnění protijedoucích vozidel je ve světlometech instalované zařízení, které pohltí nerovnosti vozovky a následné houpání vozu.

1.1.4 Bi-Xenonové výbojky

Zdrojem bi-xenonových světlometů je, stejně jako u těch klasických, výbojka. Rozdíl mezi klasickými xenony a bi-xenonovými světlomety spočívá v tom, že bi-xenony můžeme přepínat mezi potkávacím a dálkovým světlem. Naproti tomu klasické xenonové světlomety slouží pouze jako tlumená světla a pro potřeby dálkového svícení je třeba použít halogenovou žárovku. K přepínání mezi tlumeným a dálkovým svícením slouží clonka, kterou ovládá elektromagnet. Ten mechanickým způsobem blokuje a propouští světlo.

Pro xenonové světlomety je charakteristická prodleva při rozsvícení. Tuto nevýhodu u bi-xenonových světlometů kompenzuje posuvné elektromagnetické stínítko. Elektrický výboj přitom svítí stále. Tím se také prodlužuje životnost výbojky.



Obrázek 10 Bi-xenonový reflektor ^[22]

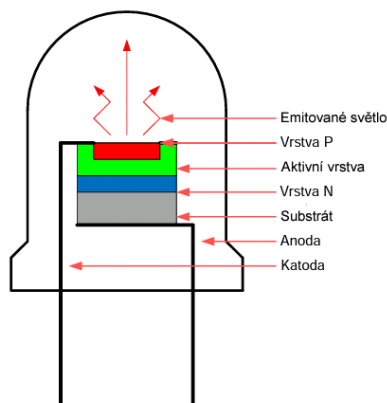
Xenonové výbojky nejčastěji používáme ve světelných zdrojích s označením AFS.

AFS

Systém AFS vyhodnocuje proměnné získané z několika optických a mechanických jednotek. Poté automatika řídí jejich činnost a následně je ovládá. AFS tedy umožňuje korekci světelného paprsku do požadovaného směru a tvaru v závislosti na rychlosti, natočení volantu vozidla a mnoha dalších proměnných pomocí mechanického natočení projektorové čočky. ^[22]

1.1.5 LED diody

Pravděpodobně nejmodernějším zdrojem světla v současné době jsou světlo emitující, zkráceně LED diody. V podstatě jsou to polovodiče, které produkují světelné záření. V posledních letech zaznamenaly velký rozvoj, mimo jiné i v automobilovém průmyslu. Stále častěji se využívají jako zdroj světla u silničních vozidel. Jejich výhodou je rychlý nástup plného výkonu. Zatímco klasická žárovka potřebuje pro přechod do plného světelného výkonu asi 200 ms, LED diodám stačí jen 3 ms. Dále je také výhodou nízký příkon, a přitom stálost barevného světla.



Obrázek 11 Struktura LED diody ^[27]

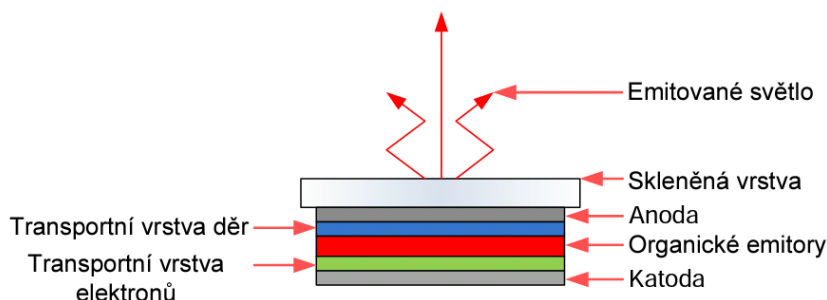
LED diodu tvoří přechod P-N. Právě v tom spočívá princip vyzařování světelného toku LED diodami. Pokud tímto přechodem prochází proud v propustném směru, přechod P-N vyzařuje nekoherentní světlo. V některých specifických případech může nastat elektroluminiscence, jedná se o jiný druh záření, konkrétně z oblasti neviditelného světla.

Chemické složení polovodiče ovlivňuje následné pásmo spektra záření diody. Toto pásmo, v jehož spektru se nacházejí právě LED diody, může být od ultrafialového až po infračervené pásmo záření. LED diody z principu nedokážou emitovat bílé světlo. Bílého světla se dříve dosahovalo použitím diod, které obsahovaly červenou, modrou a zelenou barvu. Jejich správným nastavením se docílilo právě bílého světla. Aby stejného efektu dosáhla LED dioda, je nezbytné použití tzv. luminoforu.

Využití LED diod v osvětlení motorových vozidel přináší mnoho výhod. Na rozdíl od klasických žárovek LED diody produkují daleko více světla, je to až přes 100 lm/W. Dále dokážou vyzářit světlo dané barvy bez nutnosti použít barevné filtry nebo soustředit světelný tok do určitého bodu. Konstruktivně jsou LED diody velmi odolné proti poškození nárazem a celkově mají dlouhou životnost. Výhodný je také rychlý náběh světelného výkonu. ^[27]

Další možností v této technologii je takzvané organické světlo – OLED. Jedná se o světelný zdroj na bázi anorganické LED. K tvorbě světla se zde používá organický materiál. Když přivedeme do některého políčka napětí, tak jsou vyvolány kladné a záporné náboje. Tyto náboje se spojují ve vyzařovací vrstvě a díky tomu produkují světelné záření. Elektrody a struktura jsou uzpůsobeny tak, aby docházelo k co největšímu střetávání nábojů ve vyzařovací vrstvě. Tento zdroj má dostatečnou intenzitu, avšak světelný tok je velmi malý. Jejich největší výhodou je bezesporu tloušťka, která je pouze několik tisíců milimetrů a konstantní rozložení světla po celé

ploše diody. V automobilech se zatím tento typ zdroje světla moc nevyužívá. Můžeme ho však v některých modelech aut vidět jako interiérové signalizační osvětlení. Nyní už také vznikají prototypy směrových světel vyvíjených firmou Hella. ^[28]



Obrázek 12 Struktura řezu OLED ^[25]

Jelikož LED diody řadíme k luminiscenčním zdrojům světla, je princip vzniku světla fyzikálně odlišný než u jiných zdrojů světla. Světlo zde nevzniká rozžhavením wolframového drátu, jak je tomu u teplotních zdrojů nebo v hořáku v baňce naplněné plynem s příměsmi. LED diody produkují studené světlo.

U LED diody, která je zapojena v propustném směru vzniká na P-N světelné záření.

„Elektron z vodivostního pásma rekombinuje s dírou ve valenčním pásmu, přičemž je uvolněna energie ve formě fotonu. Jde o zářivý přechod, přičemž vlnová délka fotonu se pro různé polovodiče liší.“

Jelikož není možné dopředu určit okamžik přechodu, jedná se o přechod samovolný, neboli spontánní. Lze dopředu určit pouze střední hodnotu, kdy k rekombinaci dojde. K výrobě P-N přechodu se využívají různé polovodičové materiály. Lze je rozdělit na LED a OLED diody. V OLED diodách využíváme organické materiály a v LED diodách anorganické materiály, například InGaN, GaAs. OLED – elektroluminiscenční diody pracují na stejném principu jako LED diody, jen polovodičový materiál je organický. Některé LED diody dokáží vyzařovat infračervené světlo, které lidské oko nedokáže zachytit. Z tohoto důvodu se na diodu nanáší materiály, které změni vlnovou délku, které je lidské oko schopno vnímat. Mezi tyto materiály patří například fosfor.

V průmyslu se využívají LED diody různých barev, nejčastěji je to červená, modrá a zelená.

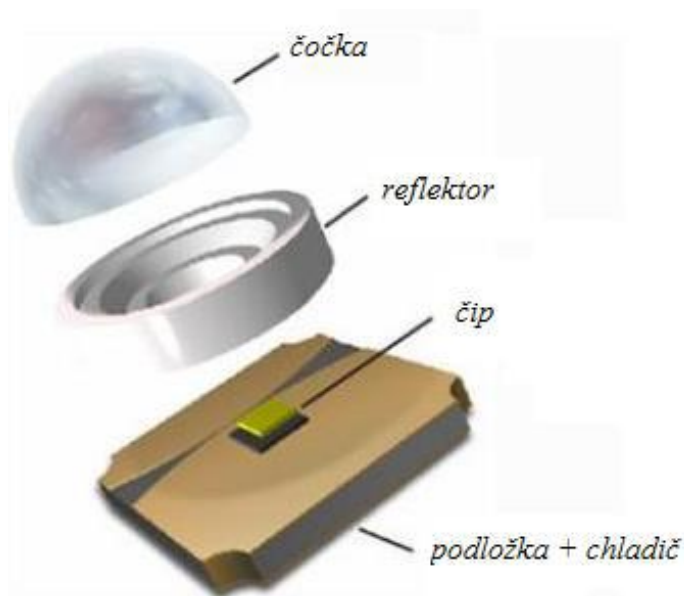
Jestliže však použijeme LED diody v automobilové dopravě, potřebujeme zde bílou barvu světla. Bílé světlo získáme z LED diod dvěma způsoby.

Princip získání bílého světla je založen na posunutí části spektra do oblasti vyšších vlnových délek. Možným zástupcem bílé LED je InGaN nebo GaN. Světelné záření ve viditelné oblasti je modré barvy, část krátkovlnných fotonů je absorbovaná a znovu emitovaná s delší vlnovou délkou.

Druhá možnost, jak získat bílé světlo u LED diod, je založena na transformaci UV světla. Z takové LED diody se UV záření, které vychází z polovodičového materiálu (např. AlGaInN), transformuje a pomícháním všech tří barev (červená, zelená, modrá) se z dané LED diody získá bílé světlo. K míchání barev však dojde až na ploše, kterou dioda osvětluje, což je nevýhoda při aplikacích v dopravě, kde požadujeme vyzařování bílé barvy už přímo ze zdroje. ^[27]

1.1.5.1 Konstrukce LED

Všechny LED diody se skládají ze čtyř základních prvků – čip, čočka, reflektor a anoda s katodou.



Obrázek 13 LED čip s chladičem ^[22]

LED zdroje ve světloometech se nejčastěji rozdělují na jednočipové a vícečipové. Jednočipové LED mají jen jeden PN přechod, naproti tomu vícečipové LED mají PN přechodů více. Vzhledem k tomuto rozdělení se uvádí příkon a světelný tok pro jeden čip.

Další rozdělení LED zdrojů je podle výkonu: miniaturní, středně výkonné a vysoce výkonné.

Miniaturní

Jsou to jednočipové diody, které se používají jako indikační. Jejich rozměry se pohybují v rozmezí od 1 do 10 mm. Proudové zatížení těchto LED diod se pohybuje od 1 mA do 20 mA. Z tohoto důvodu není zapotřebí dodatečné chlazení. Na následujícím obrázku můžeme vidět 5mm LED diodu.



Obrázek 14 5mm červená LED dioda ^[22]

Středně výkonné

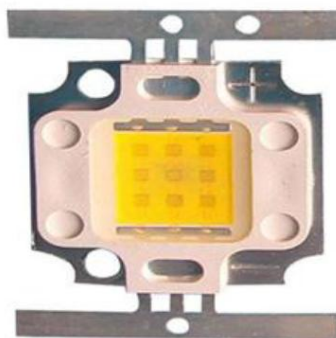
Tyto středně výkonné LED diody bývají většinou osázeny dvěma anodami a katodami. Díky tomuto konstrukčnímu řešení je zajištěna lepší kondukce pro odvod vzniklého tepla a nemusí se u většiny případů dávat dodatečný chladič. Proudové zatížení je do 100 mA.



Obrázek 15 LED dioda se dvěma anodami a katodami ^[22]

Vysoce výkonné

Tyto LED diody se označují jako High Power LED. Jejich proudové zatížení může být až v jednotkách ampér a dokážou dodávat světelný tok v řádech tisíce lumenů. Díky tak vysokému světelnému toku nacházejí uplatnění například při osvětlení stadionů, ulic či v konstrukci světlometů. Jedinou nevýhodou těchto LED diod je vznik velkého množství tepla, které je potřeba chladit.



Obrázek 16 High Power LED ^[22]

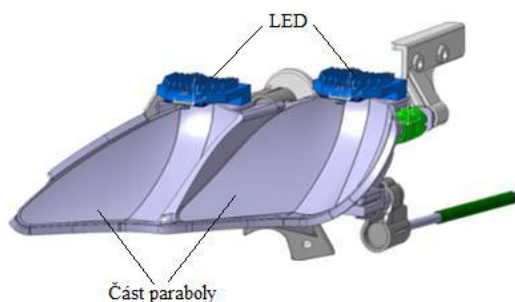
Materiál	Druh elektromagnetického záření	λ [nm]	U [V]
SiC, GaN	modrá barva	450	3,6
GaP	zelená barva	565	2,2
GaAs _{0,15} P _{0,85} N	žlutá barva	580	2,1
GaAs _{0,35} P _{0,65} N, GaAs _{0,6} P _{0,4} , GaPZnO	červená barva	635	2,0
SiC, GaN, luminofor na povrchu	bílá barva	450 - 650	3,6
GaAsSi	Infračervené záření	820 - 950	1,5

Tabulka 1 Různé materiály PN přechodu a jejich vlastnosti ^[22]

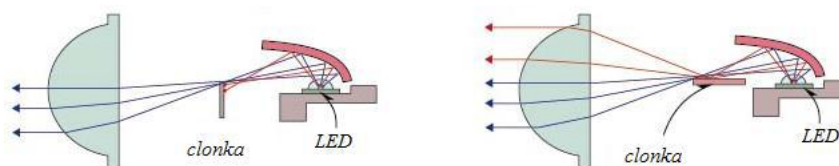
U některých LED zdrojů se až 70 % elektrické energie přemění na teplo. Zbýlých 30 % tvoří světlo. Kdybychom toto porovnali s klasickou žárovkou, která přemění pouze 5 % energie na světlo, je to i tak 6× lepší účinnost. Jakmile by nedocházelo k odvodu tepla z čipu LED, dioda pracuje ve zvýšených teplotách, což velmi razantně ovlivňuje její výkonnost a životnost. Nesmí být překročena limitní teplota povolená výrobcem. V současnosti se tato teplota pohybuje od 90°C do 120°C. Pokud dojde k překročení povolené teploty, dochází k degradaci čipu. Snahou výrobců je nalezení nových materiálů s malými nároky na chlazení a s vysokou stabilitou při vysokých teplotách.

1.1.5.2 LED světlomet

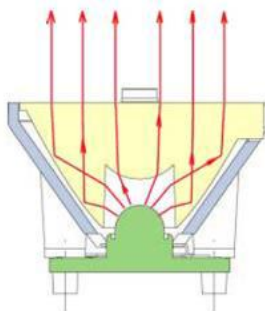
Jedná se o velmi efektivní světelný zdroj, který vydrží nepřetržitě svítit až několik desítek tisíc hodin a je mrazuvzdorný. Díky jeho malým rozměrům umožňuje variabilní design. Protože tento zdroj je málo energeticky náročný, proto je mnohonásobně úspornější oproti ostatním světelným zdrojům. V dnešní době se ve světlometech využívá reflektorový systém optiky ve formě půlené paraboly a dvou komor, zdroj zde není umístěn v ohnisku. Další systém, který se využívá je, projektorový či optický systém.^[22]



Obrázek 17 Reflektorový systém LED^[22]



Obrázek 18 Projektorový systém LED^[22]



Obrázek 19 Optický systém s lisovanou čočkou ^[22]

Výhody

- Nižší spotřeba elektrické energie při vyšším světelném toku.
- Teplota světla je podobná dennímu.
- Dlouhá životnost.
- Malé rozměry.
- Odolnost proti vibracím a nárazům.

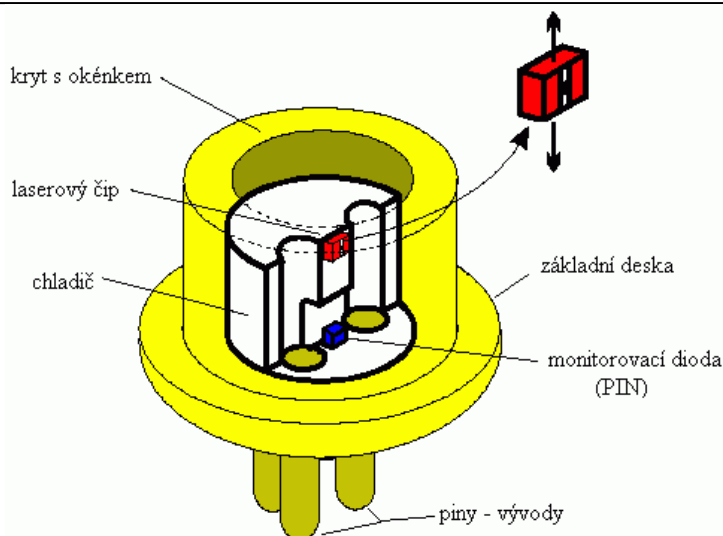
Nevýhody

- Pokles světelného výkonu a životnosti v závislosti na teplotě LED čipu.
- Citlivost na přesné napětí.
- Kvůli vysokému světelnému toku musí být ze zákona instalovány ostřikovače světlometů.

1.1.6 Laserové diody

Laserové světlomety pracují s koherentním a monochromatickým modrým světlem, které je transformováno na bílé světlo. Speciální čočky usměrní emitující světlo tří vysoce výkonných laserových diod na fluorescenční fosforovou substanci. Tato substance převádí paprsky světla na intenzivní bílé světlo, které je díky podobnosti dennímu světlu pro člověka příjemné. Laserové diody vyzařují světlo z hrany přechodu. Laserový čip musí být umístěn na chladiči.

Záření vzniká při přechodu elektronů ze stavu s větší energií do stavu s nižší energií během emise fotonů. V důsledku dopadajícího fotonu na energetickou hladinu elektron přeskočí na vyšší energetickou hladinu. ^[10]



Obrázek 20 Konstrukce Laserové diody ^[6]

1.2 Rozdělení podle charakteru vydávaného světla

- **Světlomety** – osvětlení okolí vozidla i na velkou vzdálenost – světla dálková a tlumená, světla do mlhy, další pomocná světla.
- **Svítilny** – osvětlení blízkého okolí nebo optická signalizace.
- **Odrázky** – svítidla aktivována cizím zdrojem, pro signalizaci.

1.2.1 Dálková a tlumená světla

- Povinná výbava téměř všech motorových vozidel.
- Vozidla s konstrukční rychlostí nad 10 km/h musí mít tlumená světla a vozidla s rychlostí nad 40 km/h musí mít i dálková světla.
- Dálkové musí účinně osvětlit do dálky, do stran rozptýlené světlo – okraj vozovky.
- Tlumené – dva požadavky: aby řidič viděl, ale přitom neoslňoval – světelný kužel skloněn k vozovce.
- Máme 4 systémy, které vychází ze základního systému angloamerického nebo evropského:
 - Symetrický: anglický, americký, evropský (používá se stále méně, zůstává u jednostopých vozidel, kde se kužel natáčí spolu s vozidlem).
 - Asymetrický: evropský.
- Pro oba evropské systémy je charakteristické sklánění světelného kužele tlumeného světla a potlačení paprsků v horní polorovině kužele.

Tlumené světlo je v ose světlometu před ohniskem odrazové plochy. Směrem dolů je stíněno clonkou.

- V symetrickém systému má tlumené světlo rozhraní potlačeného světla vodorovné a souměrné na obě strany.

V asymetrickém systému má tlumené světlo na straně k protijedoucímu vozidlu vodorovné potlačení světla a na straně opačné zvednuté vzhůru pod úhlem 15^0 . Okraj vozovky je tudíž osvětlen více do dálky. ^[1]

1.2.2 Světla do mlhy

- na rozdíl od světel tlumených a dálkových, nejsou povinná.
- Jejich úkolem je zlepšit osvětlení za mimořádných atmosférických podmínek (déšť, sníh, prach).
- Umístění mlhových světel na vozidle je co nejnižší k vozovce – zlepšuje viditelnost v méně husté mlze (u vozovky je řidší).
- Tato světla jsou konstruována jako širokozářící, osvětlující vozovku v nízkém, širokém pásu.
- Nebo jako bodová, která zaručují osvětlení na větší vzdálenost. Pro běžný provoz je vhodnější první typ.

1.2.3 Konstrukční světlomety

- Pracovní světla – při manipulaci s nákladem, osvětlení pracovního prostoru – např. práce s pluhem.
- Zpětná světla – mají za úkol osvětlovat vozovku za vozidlem při jízdě vzad, signalizace couvání, aktivace při zařazení „zpátečky“.
- Upevnění – pevné nebo s možností nastavení.

1.2.4 Svítilny

- Samostatné.
- Skupinové (společné pouze pouzdro).
- Sdružené (společný i zdroj světla).
- Sloučené (společný naopak optický systém).

Světlomety a svítilny se skládají ze zdroje světla, optického systému (odrazová plocha, průsvitný kryt) a pouzdra. ^[1]

žárovka	patice	obvyklý příkon	použití	obrázek	žárovka	patice	obvyklý příkon	použití	obrázek
H4	P43t	60/55W	hlavní světlomety		R2	P43t / Ba20d	45/40W	hlavní světlomety (asym.) pro starší vozidla kde nebyly halogeny	
H3	Pk22s	55W	přídavné mlhové a dálkové		21W	Ba15s	21W	blinkry, brzdová, zpětná světla	
H1	P14,5s	55W	přídavné dálkové světlomety (často integrované s hlavním světlometem)		21W oran.	BaU15s	21W	blinkry	
H2	X511	55W	dálkové a mlhové světlomety		5W	Ba15s	5W	zadní obrysová světla	
H7	P26d	55W	přídavné dálkové světlomety (často integrované s hlavním světlometem) nástupce H1		10W	Ba15s	10W	zadní obrysová světla	
HB3	P20d	65W	dálkové světlomety		21/5W	BaY15d	21/5W	brzdová/obrysová světla	
HB4	P22d	55W	potkávací světlomety		5W	W2,1x9,5d	5W	boční blinkry, přední obrysová světla	
D2S	P32d	35W	tlumené a dálkové světlomety		4W	Ba9s	4W	boční blinkry, přední obrysová světla	
D2R	P32 d-3	35W	tlumené světlomety		5W suffit	SV 8,5	5W	vnitřní osvětlení	
					1,2/2W	W2x4,6d B8,3d B8,5d B8,7d	1/1,2/2W	osvětlení přístrojové desky	

Obrázek 21 Přehled nejčastěji používaných zdrojů světla v automobilu ^[1]

1.3 Porovnání jednotlivých zdrojů světla

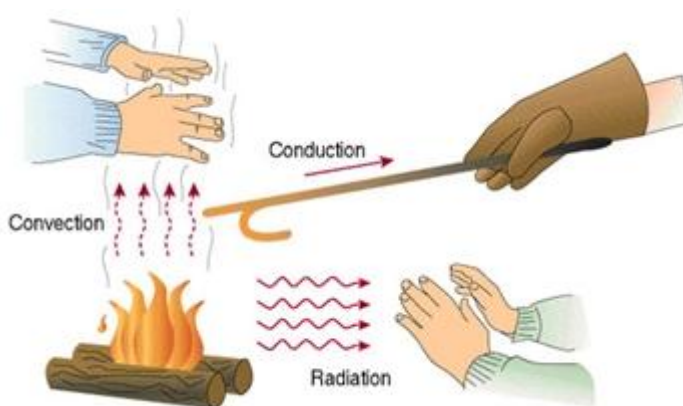
	Výhody	Nevýhody
Klasické žárovky	<ul style="list-style-type: none"> Jednoduchá konstrukce Věrné podání barev Nízká hmotnost Možnost regulace světelného toku Nízká pořizovací cena Teplota chromatičnosti 2 700 až 2 900 K 	<ul style="list-style-type: none"> Zásadní nedostatek je malý měrný výkon Nízká životnost (1 000 h) Přetržení vlákna z důvodu otřesu Závislost parametrů žárovky na napájecím napětí (životnost) Pokles světelného toku v průběhu života
Halogenové žárovky	<ul style="list-style-type: none"> Světelný tok 1 500 – 2 000 lm Jednoduchá konstrukce Relativně nízká pořizovací cena Snadná výměna 	<ul style="list-style-type: none"> Citlivé na dotyk mastnou rukou – dojde k následnému prasknutí vlákna Vysoká energetická náročnost (55-65 W) Má nižší teplotu chromatičnosti než denní světlo – zhoršuje viditelnost
Xenonové výbojky	<ul style="list-style-type: none"> Dlouhá životnost (okolo 3 000h) Větší dosvit světelného kužele oproti halogenům Nížší spotřeba – 35 W 2,5× více světla oproti halogenové žárovce při stejném příkonu 	<ul style="list-style-type: none"> Nutnost speciálních systémů – elektronická řídicí jednotka a startér Systém automatického nastavování sklonu Ostřikovač světlometů Výměnu žárovky nutno provádět v service
LED diody	<ul style="list-style-type: none"> Výrazně nižší spotřeba při zvýšeném světelném toku Teplota chromatičnosti srovnatelná s denním světlem Velmi vysoká životnost – trvající déle než je životnost automobilu Odolnost proti nárazům Malé rozměry 	<ul style="list-style-type: none"> Citlivost na přesné napětí Světelný tok přesahuje hodnotu 2 000 lm – musí být na voze instalovány ostřikovače světlometů Pokles světelného výkonu a životnosti v závislosti na teplotě – v automobilu může dojít k přehřátí pouzdra diody. Zde pak dochází k selhání.

Tabulka 2 Porovnání zdrojů světla v automobilu

2 TERMIKA ZDROJŮ SVĚTLA

Teplo může být přenášeno třemi způsoby a to vedením, prouděním a sáláním. Světlo u automobilu pracuje v různých podmínkách. Teplota v zimě může klesat až pod -20°C a v létě až k $+40^{\circ}\text{C}$. Vlivem přímého slunečního záření může dojít (radiace) k ohřátí světloometu až přes 60°C . Další, co působí na ohřev světloometu, je motor. Ten se většinou nachází v těsné blízkosti světloometu.

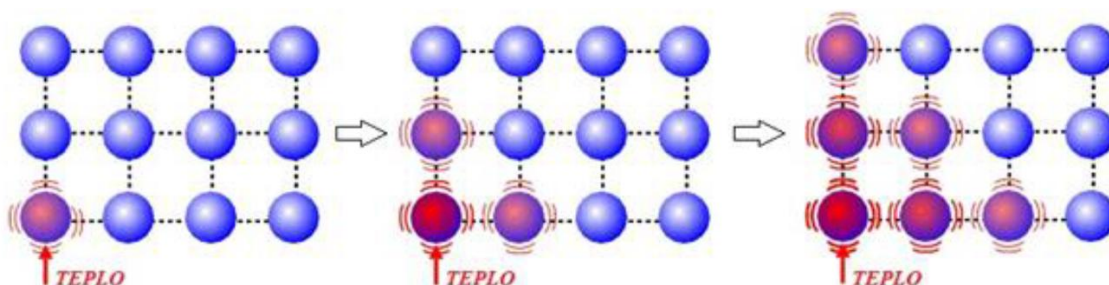
Protože jsou některé světloometry omezeny maximální možnou teplotou, není možné vliv okolního prostředí na světlomet zanedbat a je potřeba při návrhu s ním počítat.



Obrázek 22 Přenos tepla^[5]

2.1.1 Konduktce (vedení)

Šíření tepla pomocí konduktce je vázáno na hmotu, a proto probíhá pouze s těsně sousedícími částicemi. Pomocí konduktce lze teplo přenášet jak v pevném, tak kapalném i plynném stavu. U světlometů probíhá především ze zdroje světla do podložky a následně do chladiče. Ten teplo odvádí do okolí pomocí konvekce. K přenosu tepla dochází tím, že kinetická energie molekul je předávána srážkami částic. Čím bude větší pravděpodobnost srážek částic, tím bude větší přenos energie uvnitř látky. Přenos tepla je tím snazší, pokud se v látce vyskytují částice, které mohou přenášet vnitřní energii.

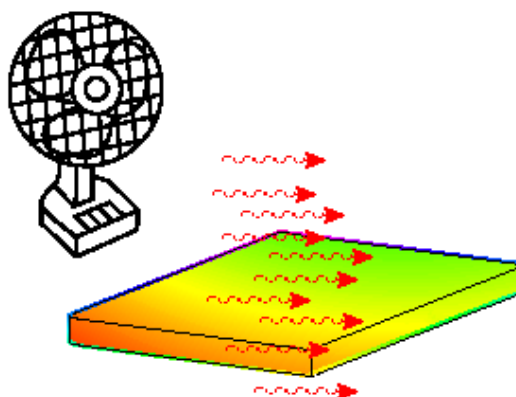


Obrázek 23 Přenos tepla kondukcí^[11]

2.1.2 Konvekce (proudění)

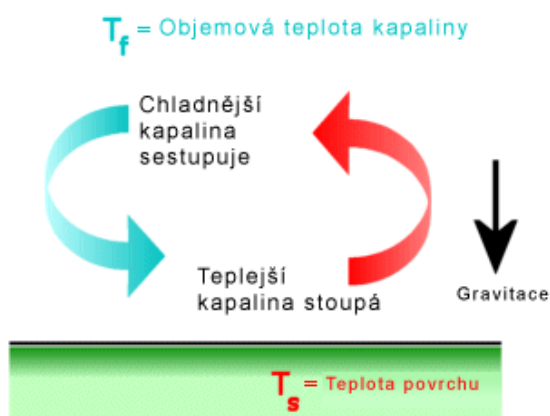
Konvekce je přenos tepla prouděním vlivem přenosu tepelné energie pohybující se částicemi v prostoru. Konvekce je v praxi nejvíce spojena s přenosem u kapalných a plynných látek. Rozlišujeme dva typy proudění, nucené nebo přirozené (samovolné) proudění.

Nucené proudění je vyvolané zásahem zvenčí, například větrem, ventilátorem atd. U světlometů k nucené konvekci dochází zpravidla u aktivního chlazení. Chladič je ochlazován proudem vzduchu, kterému je vystaven.



Obrázek 24 Nucené proudění ^[12]

Samovolné proudění je takové, při kterém se ohřevem zmenšuje hustota látek. Mezi místem ochlazení a místem ohřevu vzniká teplotní rozdíl. Teplejší látka má nižší hustotu a díky vztlaku začne stoupat. Chladnější látka se poté dostává na místo ohřáté látky a proces se opakuje.

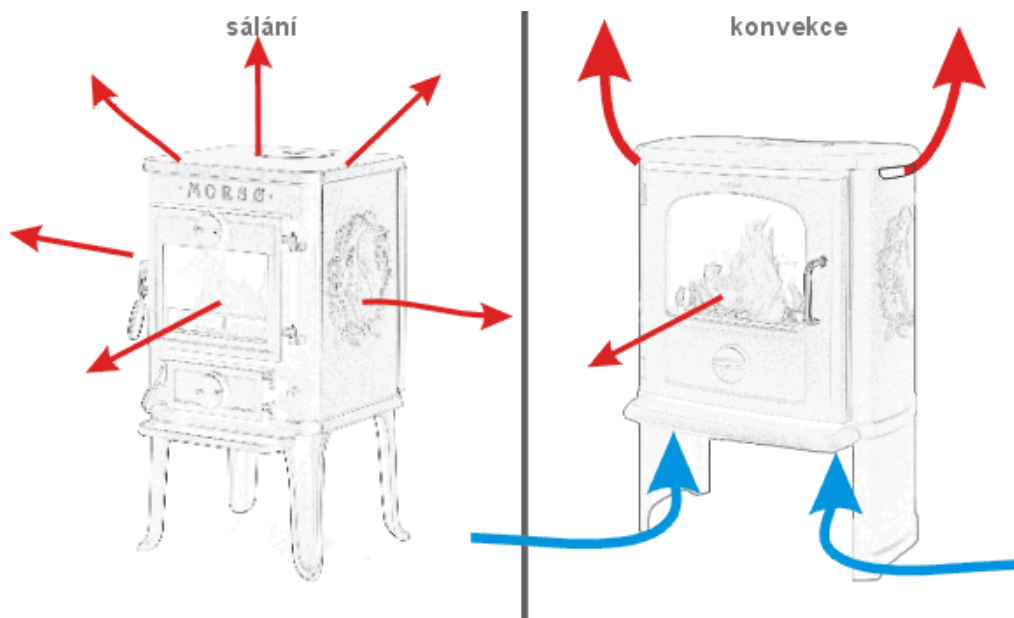


Obrázek 25 Samovolné proudění ^[12]

2.1.3 Radiace (sálání)

Je to tepelné záření elektromagnetického vlnění o určitém spektru vlnových délek. Tepelnou energii vyzařuje každé těleso, které má teplotu vyšší než 0 K, vyzařuje fotony, které jsou nositeli energie. Fotony nejsou vázány na hmotné prostředí a šíří se rychlostí světla, což značí, že radiace je nejrychlejší způsob šíření tepla. Mohou nastat tři jevy týkající se přenosu tepla pomocí radiace:

- Část záření může prostoupit tělesem.
- Část dopadajícího záření může být pohlcena.
- Část záření může být odražena.

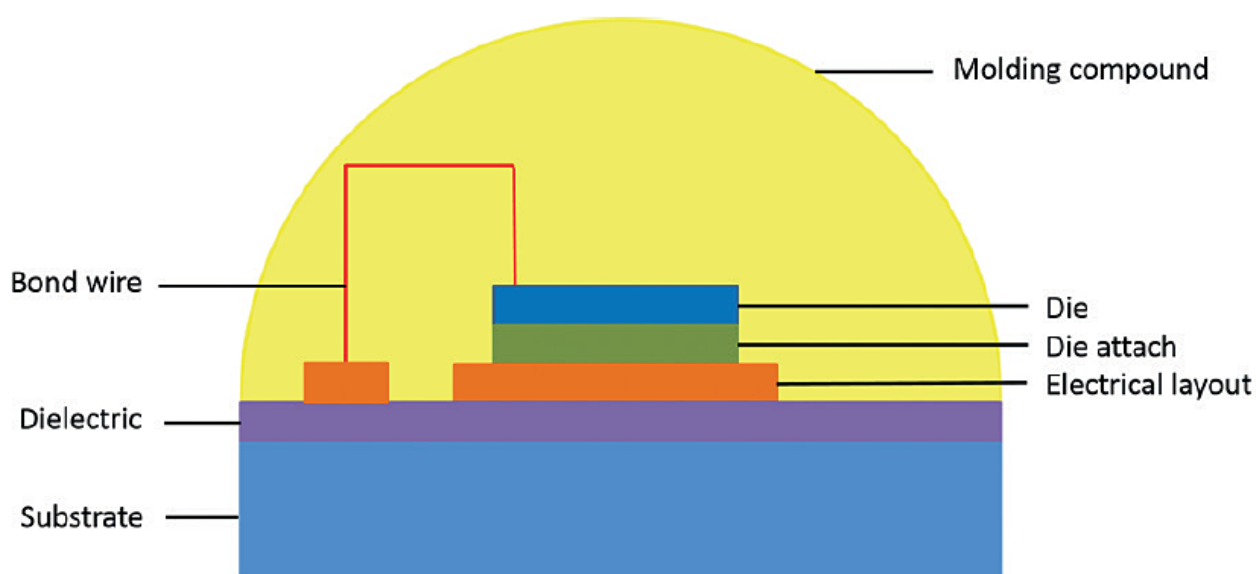


Obrázek 26 Rozdíl mezi konvekcí a radiací ^[8]

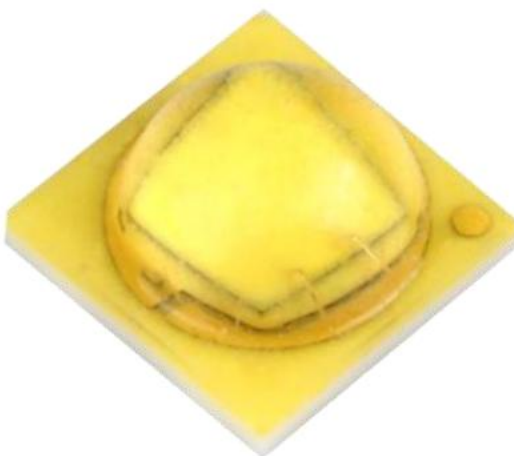
3 ZJEDNODUŠENÝ MODEL LED DIODY V INVENTORU

Pro vytvoření zjednodušeného modelu LED diody bylo využito programu Autodesk Inventor Professional. Tento program je 3D CAD software určený k návrhu především strojních součástí a sestav. Z těchto návrhů lze vytvořit výkresovou dokumentaci a provádět pevnostní analýzy a dynamické simulace. Jako další výhodu tohoto programu můžeme uvést zabudovanou funkci kontroly geometrických nedostatků.

Pro modelaci jsme si vybrali LED diodu Power Z5 – M2. Její rozměry nám poskytla firma Automotive Lighting Jihlava. Z těchto získaných rozměrů jsme poté vytvořili v Autodesk Inventuru zjednodušený model LED diody Power Z5 – M2.



Obrázek 27 Zjednodušený model LED diody^[14]



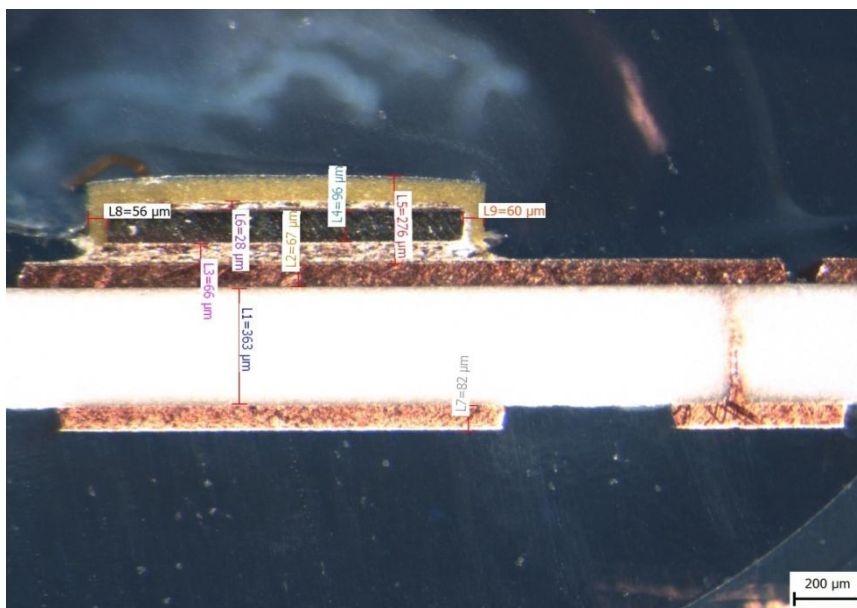
Obrázek 28 LED dioda Z Power Z5 – M2^[26]

Základní vlastnosti LED diody Power Z5 – M2

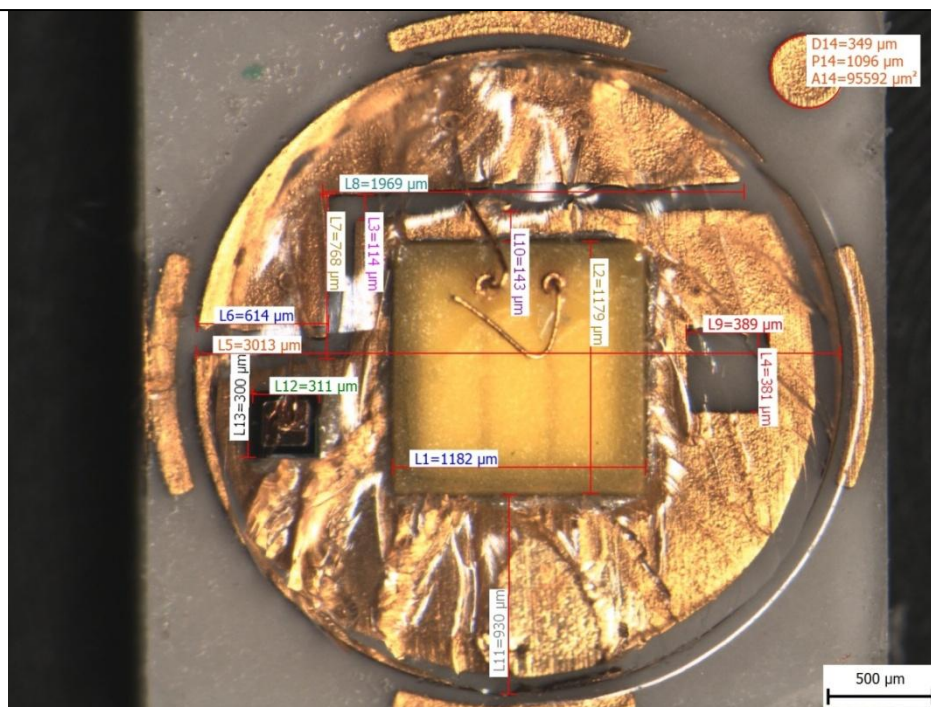
- Tato řada diod je navržena na vysokou svítivost a účinnost.
- Široký rozsah barevného podání světla – od 2 600-7 000 K.
- Z Power LED jsou ideálním zdrojem světla pro všestranné využití – směrové svícení v bodovém osvětlení, venkovní osvětlení, osvětlení v automobilovém průmyslu a použití pro vysoce výkonné svítidly.
- Navrženo pro práci při vysokém proudu.
- Vysoký index barevného podání.

Parametr	Symbol	Hodnota			Jednotka
		min	Typ	Max	
Propustný proud	I_F	-		1 500	mA
Krátkodobý špičkový proud	I_F	-		2 000	mA
Zpětné napětí	V_R	-		5	V
Ztrátový výkon	P_D	-		5,22	W
Propustné napětí	V_F	-		3	V
Teplota přechodu	T_j	-		150	°C
Provozní teplota	T_{opr}	-40	-	125	°C
Skladovací teplota	T_{stg}	-40	-	125	°C
Vyzařovací úhel	θ	118			degree

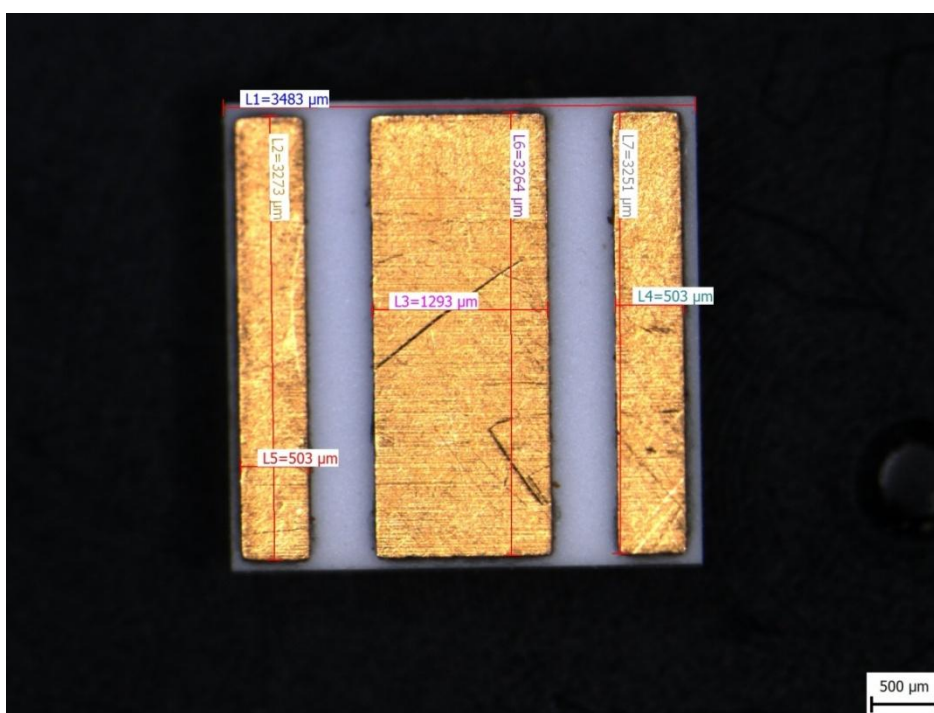
Tabulka 3 Parametry LED diody Z Power Z5 – M2 ^[26]



Obrázek 29 Pohled z boku na rozměry modelované LED diody Power Z5 – M2



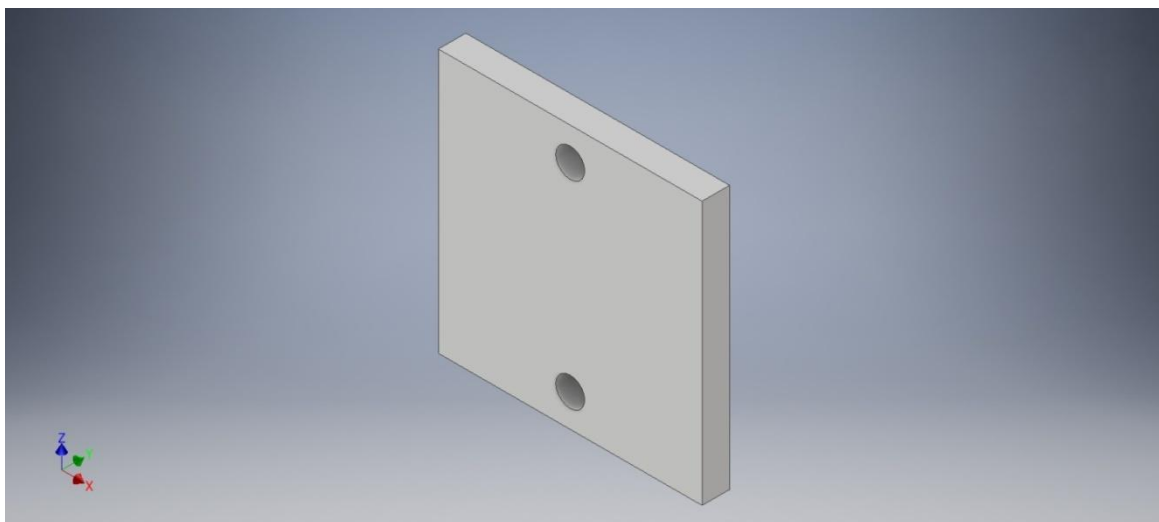
Obrázek 30 Pohled shora na rozměry modelované LED diody Power Z5 – M2



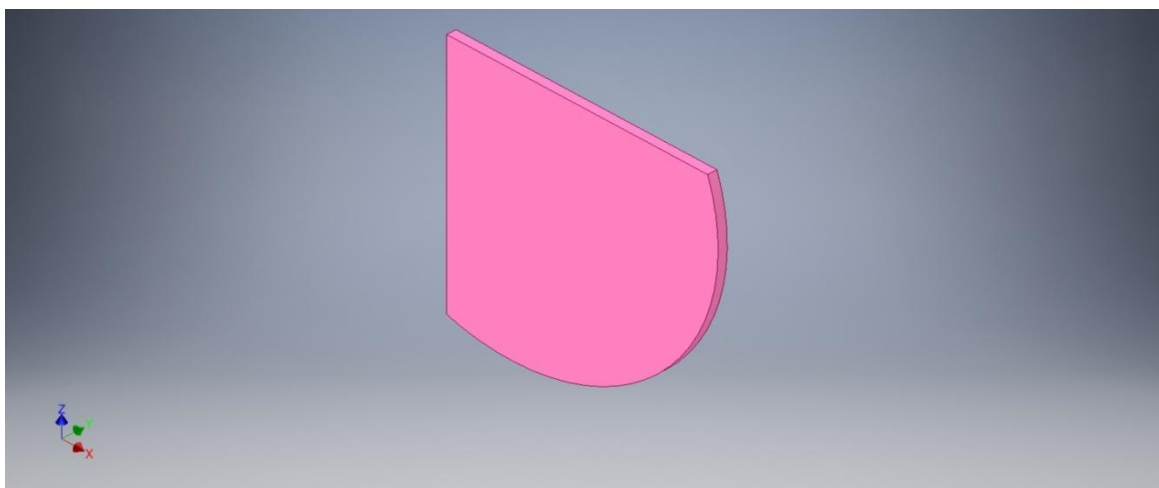
Obrázek 31 Pohled ze spodní strany na rozměry modelované LED diody Power Z5 – M2

3.1 Vytvoření modelu v Autodesk Inventor Professional

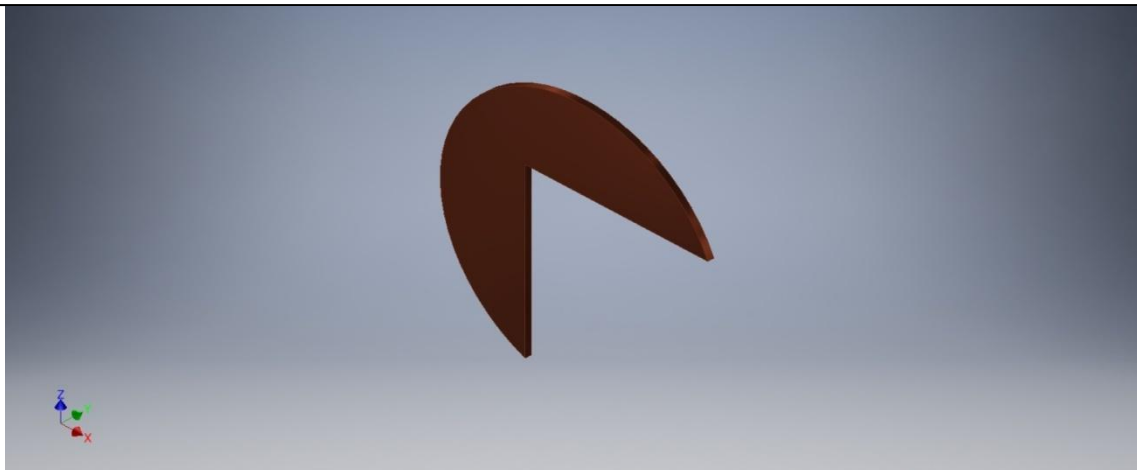
Pomocí programu Autodesk Inventor Professional jsme prvně vytvořili podle dodaných rozměrů jednotlivé části modelované LED diody Power Z5 – M2. Jakmile jsme měli vytvořené všechny části, otevřeli jsme v Inventoru nový projekt – sestava. V tomto vývojovém prostředí se jednotlivé části LED diody pospojovaly a vytvořil se výsledný zjednodušený model.



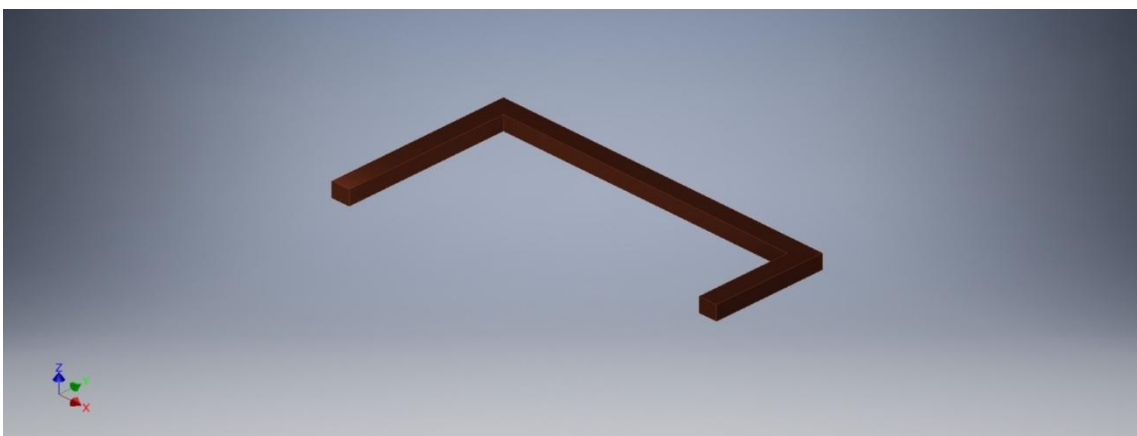
Obrázek 32 Izolační deska LED diody Power Z5 – M2



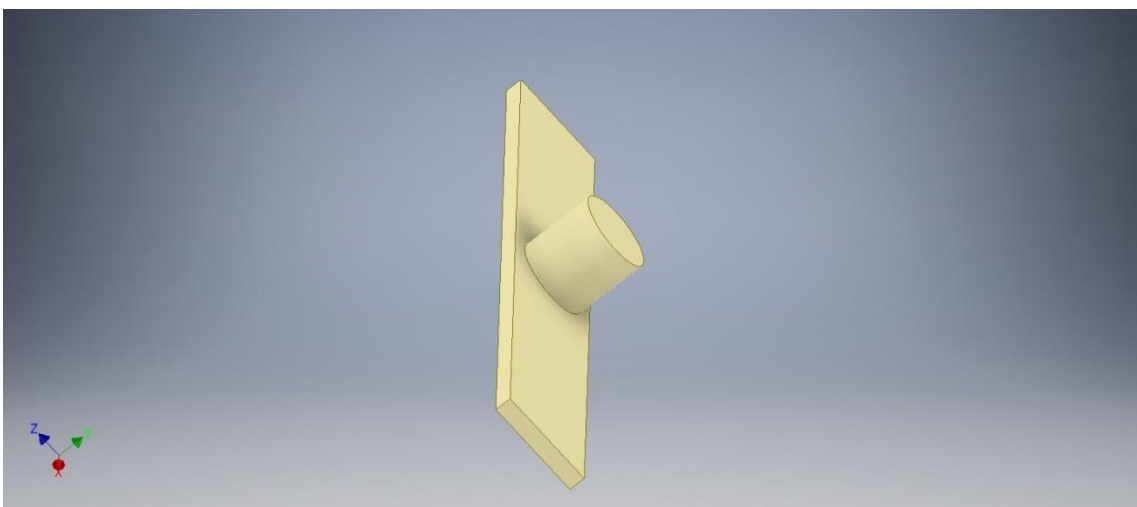
Obrázek 33 Měděná destička ke katodě LED diody Power Z5 – M2



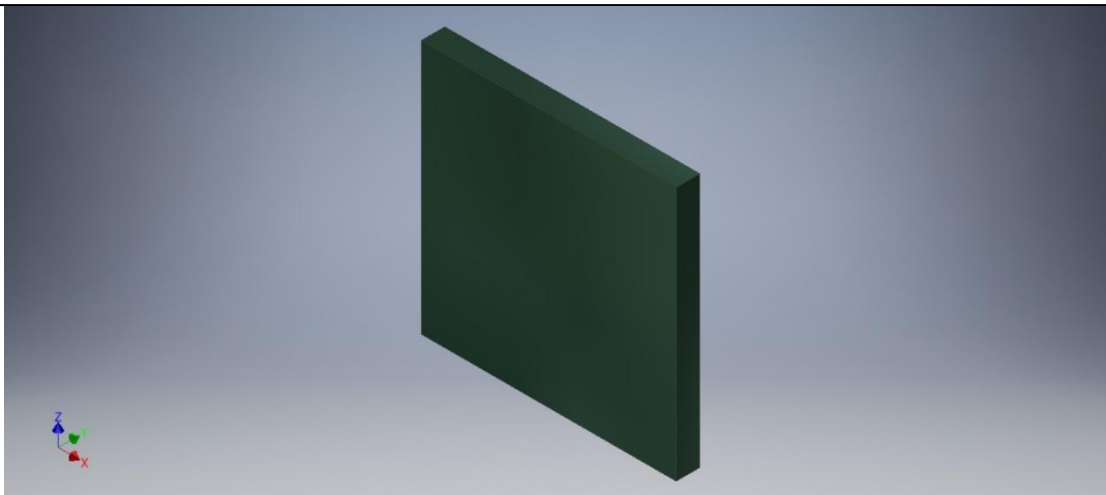
Obrázek 34 Měděná destička k anodě LED diody Power Z5 – M2



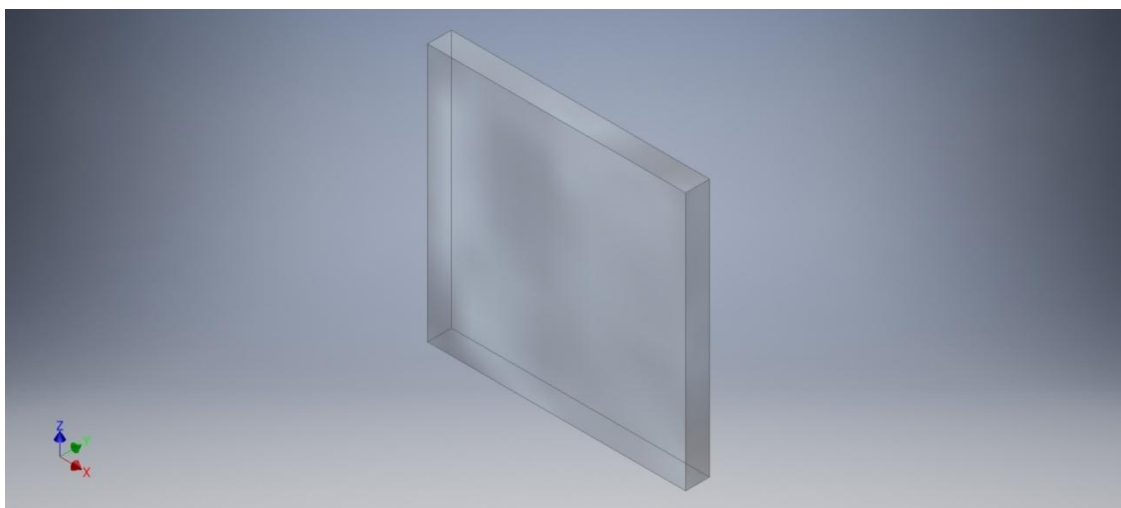
Obrázek 35 Měděný drátek spojující měděnou destičku k anodě a polovodič typu P



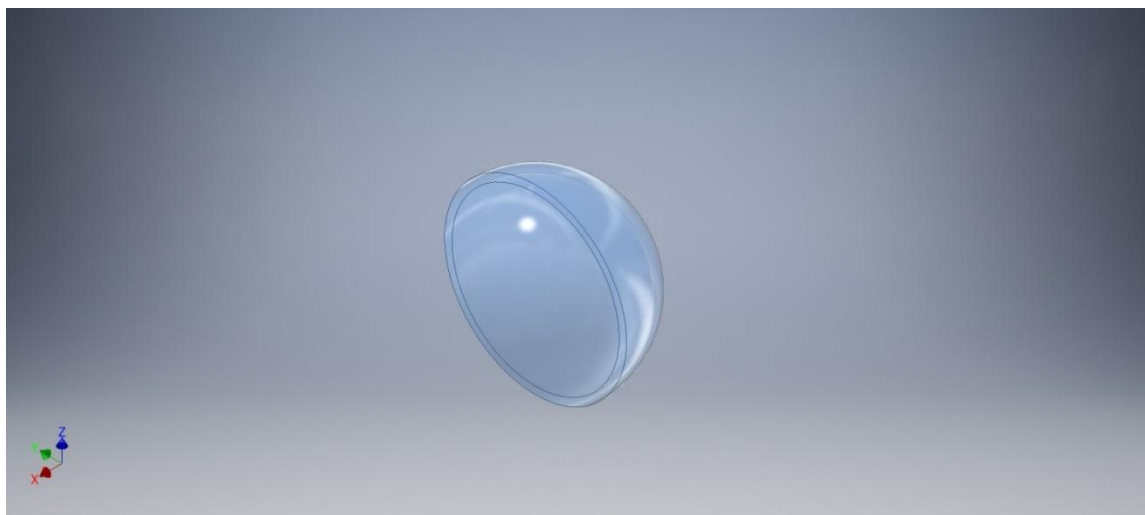
Obrázek 36 Kontakt pro anodu a katodu



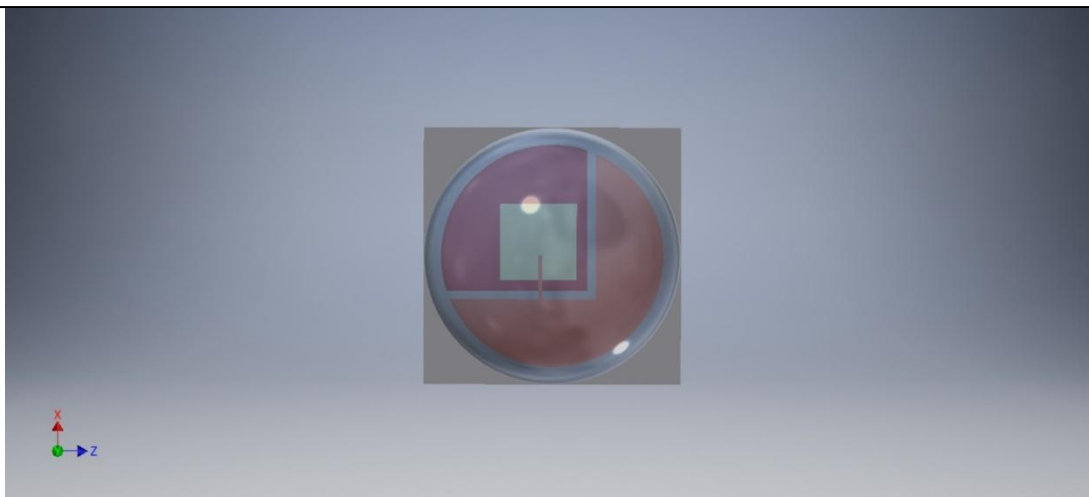
Obrázek 37 Polovodič typu P



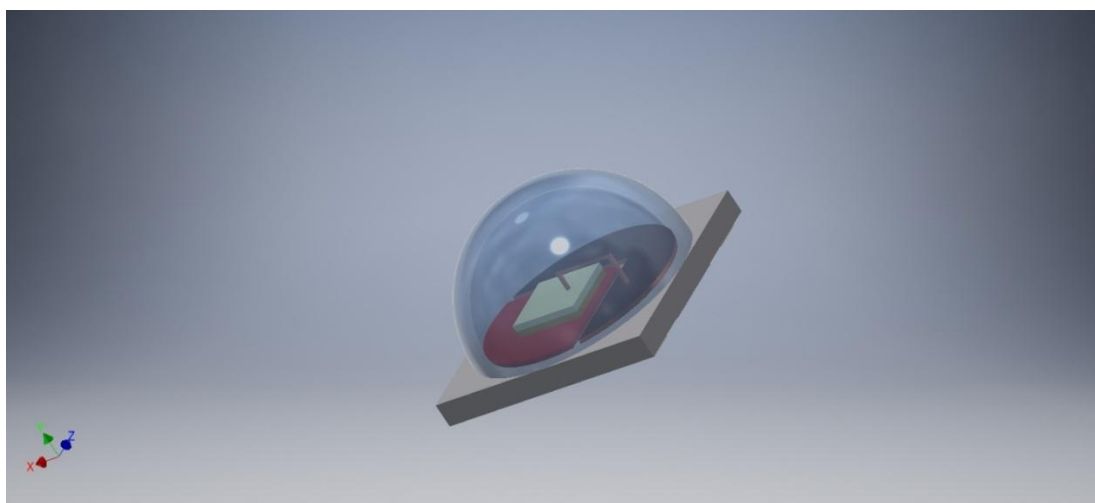
Obrázek 38 Polovodič typu N



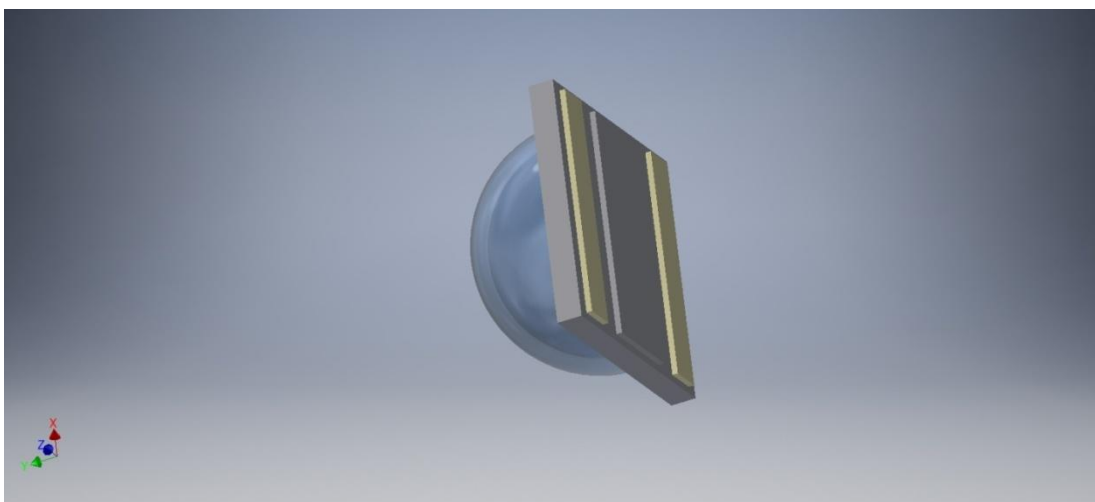
Obrázek 39 Čočka LED diody Power Z5 – M2



Obrázek 40 Zjednodušený model LED diody Power Z5 – M2

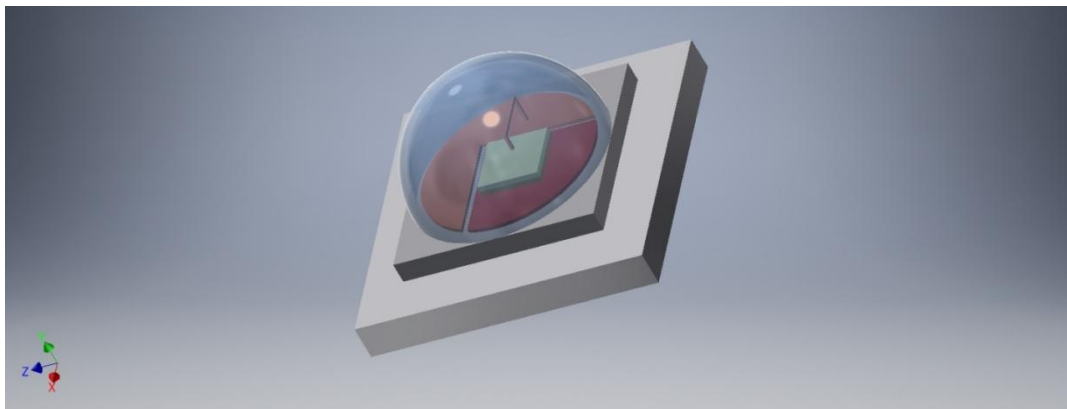


Obrázek 41 Zjednodušený model LED diody Power Z5 – M2 (2)

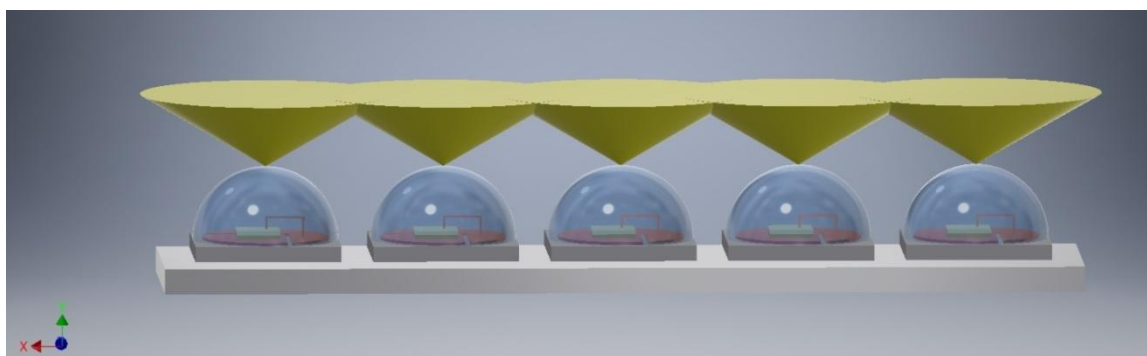


Obrázek 42 Zjednodušený model LED diody Power Z5 – M2 (3)

Po vytvoření modelu LED diody jsme tento model importovali do programu Workbench, kde jsme prováděli výpočty oteplení. Pro další měření jsme vytvořili modely jedné LED diody na chladiči, 5 LED diod na chladiči, které jsou blízko u sebe (světelné paprsky se překrývají) a 5 LED diod na chladiči, které jsou dál od sebe (světelné paprsky se nepřekrývají).

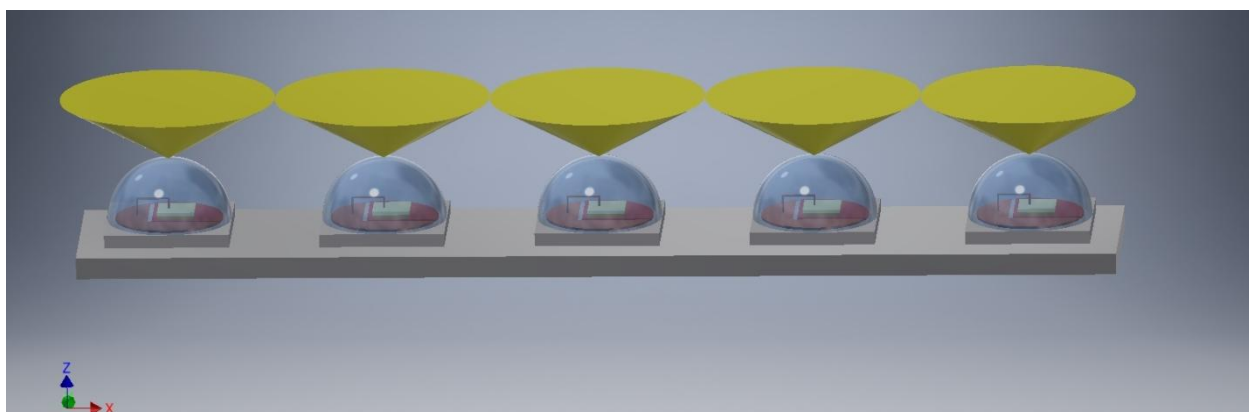


Obrázek 43 LED dioda Power Z5 – M2 na chladiči



Obrázek 44 5x LED dioda Power Z5 – M2 u sebe na chladiči

Na tomto obrázku 44 je vidět, jak jednotlivé LED diody jsou blízko u sebe a světelné kužely se překrývají. Jejich vyzařovací úhel je 118° .



Obrázek 45 5x LED dioda Power Z5 - M2 dál od sebe na chladiči

Na tomto obrázku 45 je vidět, jak jednotlivé LED diody jsou dál od sebe a světelné kužely se nepřekrývají. Jejich vyzařovací úhel je 118° .

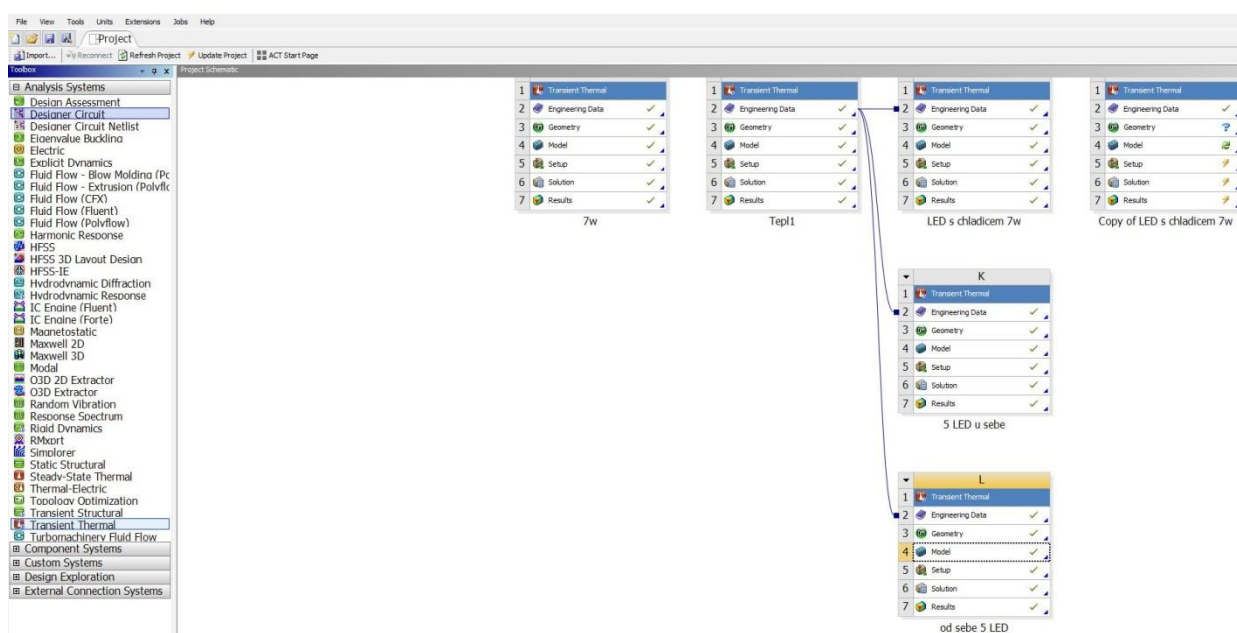
4 VÝPOČET OTEPLENÍ LED POMOCÍ MKP

Metoda konečných prvků (MKP) je numerická metoda, která slouží k provádění simulací průběhů deformací, proudění tepla, napětí, proudění tekutin, vlastních frekvencí atd. na vytvořeném fyzikálním modelu.

Princip této metody spočívá v diskretizaci spojitého kontinua do konečného určitého počtu prvků. Zjištěné parametry jsou určeny v jednotlivých uzlových bodech.

Metodu konečných prvků nejvíce využíváme pro kontrolu již navržených zařízení, nebo pro zjištění nejkritičtějšího místa konstrukce. Přestože teoretické základy MKP jsou známé již mnoho desítek let, teprve rozvoj nových technologií umožnil její rozsáhlé využití.

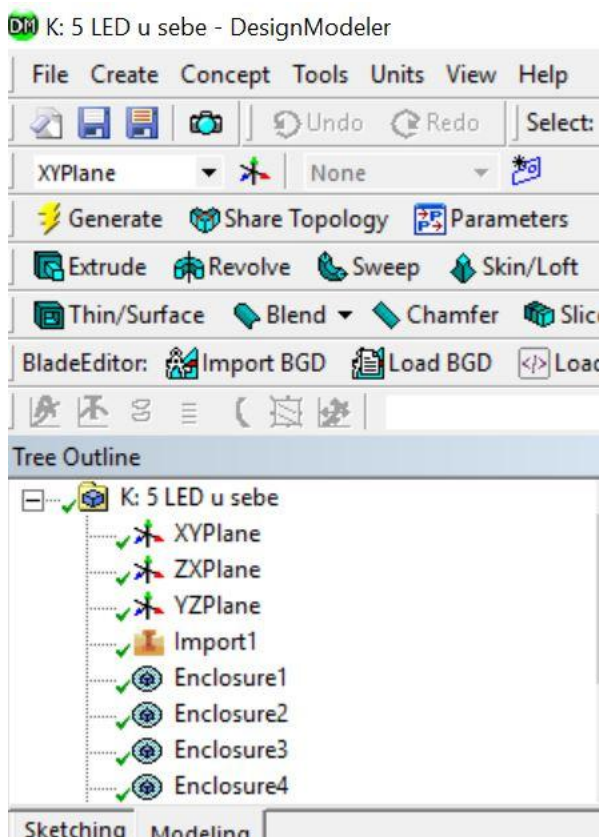
4.1 Nastavení v programu Workbench



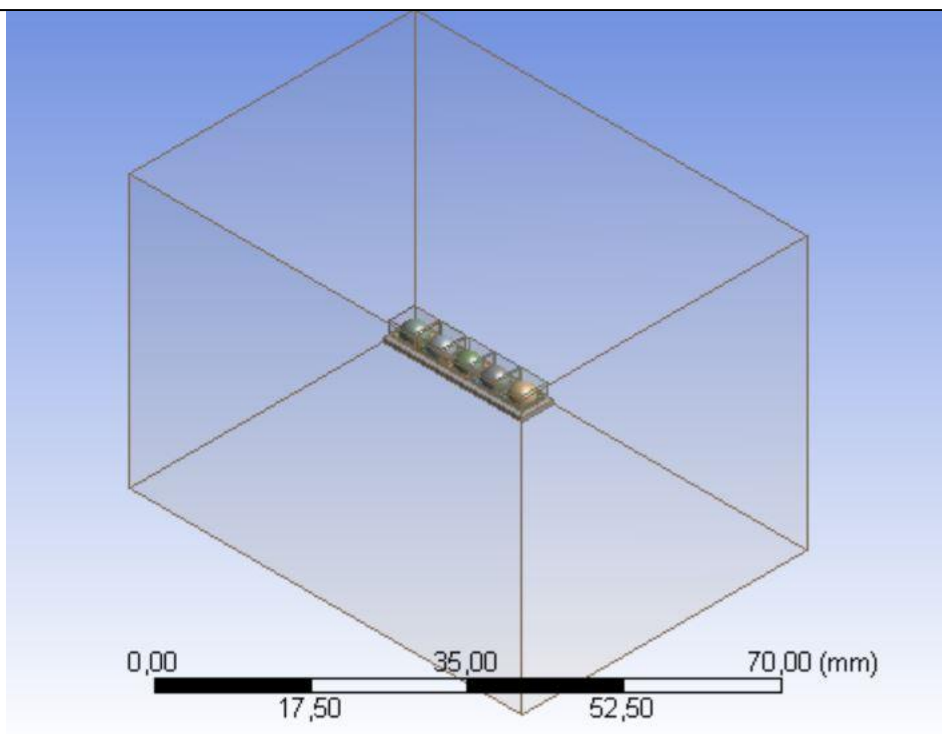
Obrázek 46 Vývojové prostředí programu Workbench

1. Spustili jsme program Ansys Workbench.
2. V levé části obrazovky jsme našli ikonu s názvem Transient Thermal a tuto ikonu přetáhli na obrazovku.
3. V Engineering Data jsme nadefinovali materiály potřebné pro výpočet oteplení LED diody.
4. Otevřeli jsme položku Geometry.
5. Zde jsme v záložce Units nastavili jednotky mm.
6. V záložce File jsme klikli na Import External Geometry file a nahráli jsme geometrická model, který jsme předtím vytvořili v programu Autodesk Inventor.
7. V nastavení položky import jsmen v záložce Operation dali Add Material
8. V záložce Tools jsme klikli na položku Enclosure.
9. V Detail View jsme klikli na Target Bodies a vybrali jsme čočku diody. Nadefinovali jsme také velikost výsledného boxu, který se kolem čočky vytvořil.
10. Vybrali jsme znovu položku Enclosure a vytvořili jsme box kolem celé LED diody.
11. Klikneme na Generate a vše pak bylo nastaveno k další práci.

12. Nastavování těchto boxů je důležité, z důvodu nastavení okolních podmínek kolem LED diody. Další nastavování probíhalo už v záložce v Model. Spustili tedy tuto část programu ze vstupního Transient Thermal.

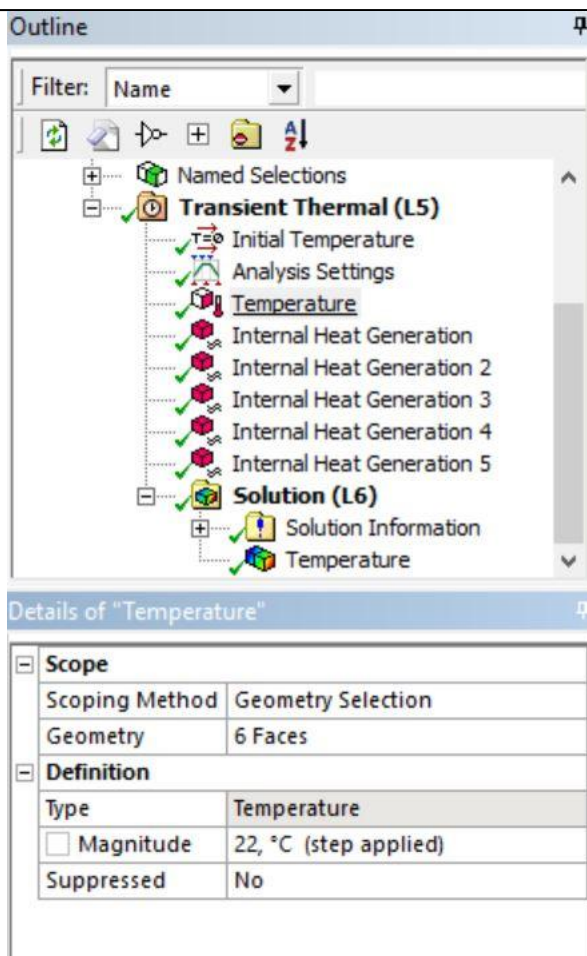


Obrázek 47 Nastavení vzdušných boxů v Modelu pro LED diody



Obrázek 48 Vytvořené vzdušné boxy

13. V Modelu jsme rozklikli Geometry, kde jsme jednotlivých částí LED diody nastavili, z jakého materiálu jsou vyrobené.
14. U položek solid jsme nastavili materiál vzduch.
15. Pravým tlačítkem jsme klikli na Transient Thermal a vložili položku Temperature a Internal Heat Generation.
16. V položce Temperature jsme nastavili teplotu okolí a nadefinovali, kde ta teplota bude. Proto máme vytvořený box, ve kterém je vzduch. V položce geometry jsme vybrali plochy boxu, ve kterém je celá LED dioda.
17. V položce Internal Heat Generation jsme nastavili příkon, Nadefinovali jsme velikost příkonu a také kde má působit. V položce Geometry jsme vybrali všechny části LED, kterými protékal proud. Potom jsme spočítali jejich celkový objem a výsledek jsme podělili hodnotou příkonu, který LED diodou protékal. Výslednou hodnotu jsme zadali do políčka Magnitude.
18. Pak jsme klikli na SOLVE a počítač nám vypočítal oteplení. Výsledky jsme našli v položce Solution – Temperature. Zde jsou hodnoty v tabulce a obrázek s tepelnou sítí simulované LED diody.



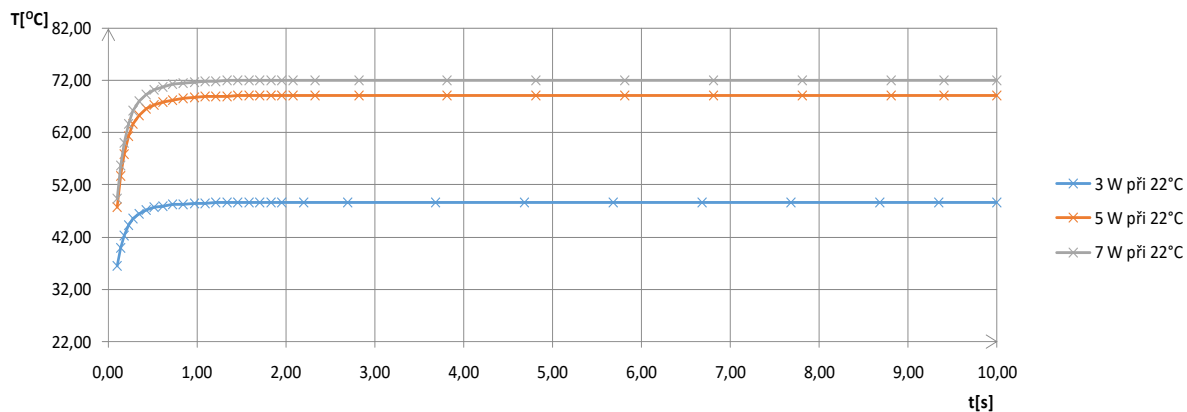
Obrázek 49 Nastavení vstupních parametrů (teplota okolí, vstupní příkon)

4.2 Výsledky simulací v programu Workbench

1. Jako první jsme simulovali samotnou LED diodu bez chladiče. Simulace jsme prováděli pro teplotu okolí 22°C a 85°C. Pro příkony LED diody 3 W, 5 W a 7 W.
2. Poté jsme provedli simulaci, jak se bude oteplovat LED dioda, když budeme měnit materiál čočky (krytu) LED diody.
3. Dále jsme přidělali LED diodu na chladič a provedli jsme opět stejnou simulaci měření pro teplotu okolí 22°C a 85°C a pro příkony LED diody 3 W, 5 W a 7 W.
4. Nyní jsme vytvořili dva modely pěti LED diod na jednom chladiči. Na prvním modelu jsou LED diody blízko u sebe a světelné paprsky se překrývají a na druhém modelu jsou LED diody dál od sebe a světelné paprsky se nepřekrývají.
5. Zhodnocení všech výsledků.

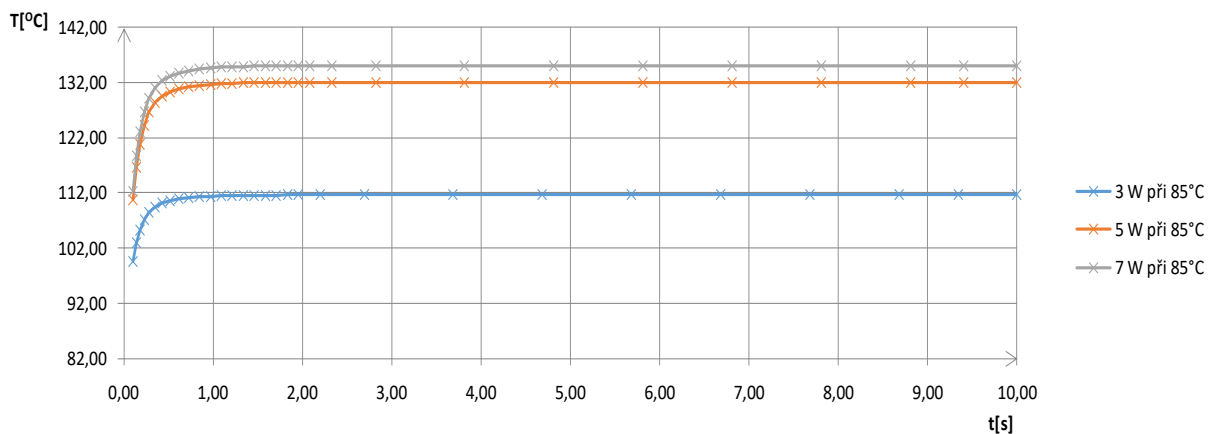
4.2.1 Výsledky simulace jedné LED diody bez chladiče

Příkon LED 3 W, 5 W a 7 W při teplotě okolí 22°C



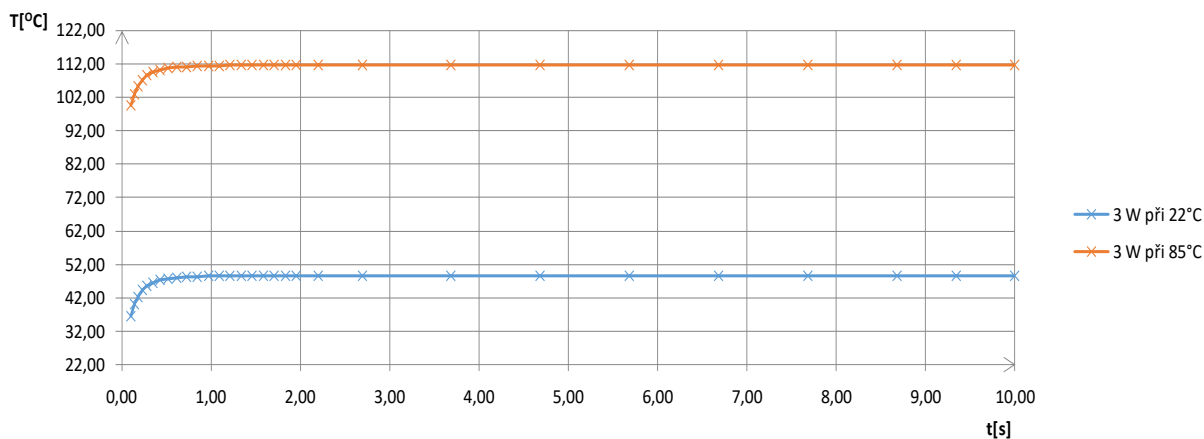
Obrázek 50 Graf oteplení LED diody při různém příkonu, teplota okolí 22°C

Příkon LED 3 W, 5 W a 7 W při teplotě okolí 85°C



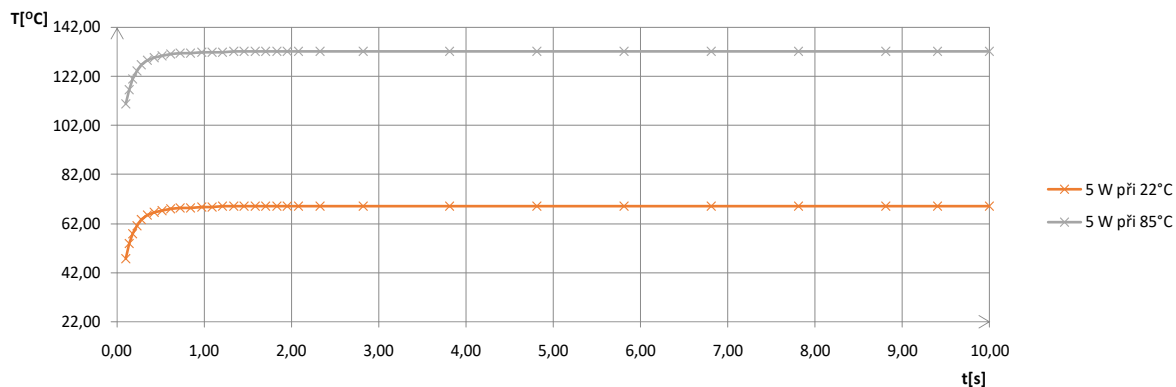
Obrázek 51 Graf oteplení LED diody při různém příkonu, teplota okolí 85°C

Příkon LED 3 W při teplotě okolí 22°C a 85°C



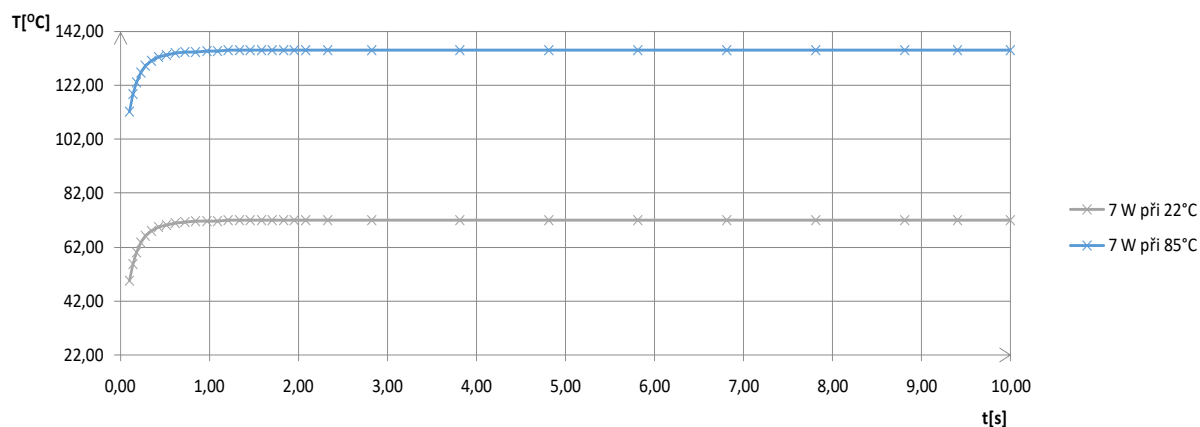
Obrázek 52 Graf oteplení LED diody při příkonu 3 W

Příkon LED 5 W při teplotě okolí 22°C a 85°C



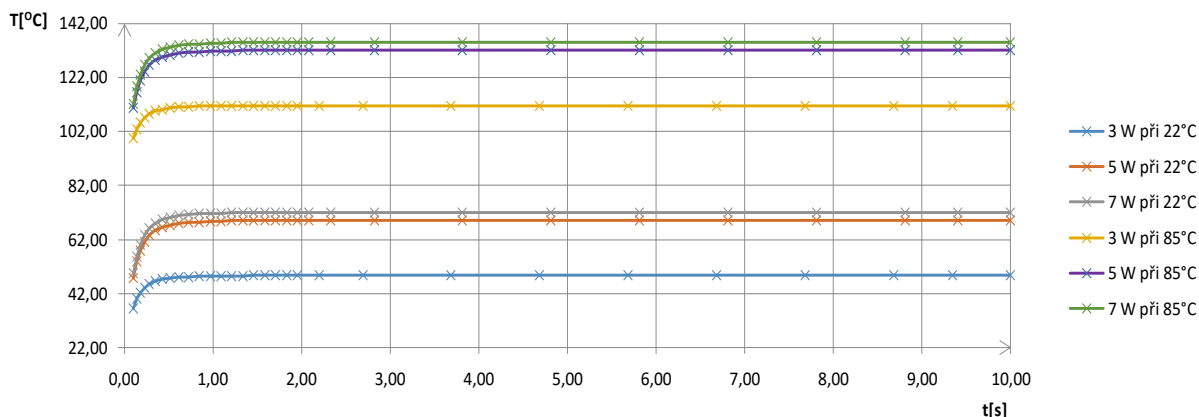
Obrázek 53 Graf oteplení LED diody při příkonu 5 W

Příkon LED 7 W při teplotě okolí 22°C a 85°C

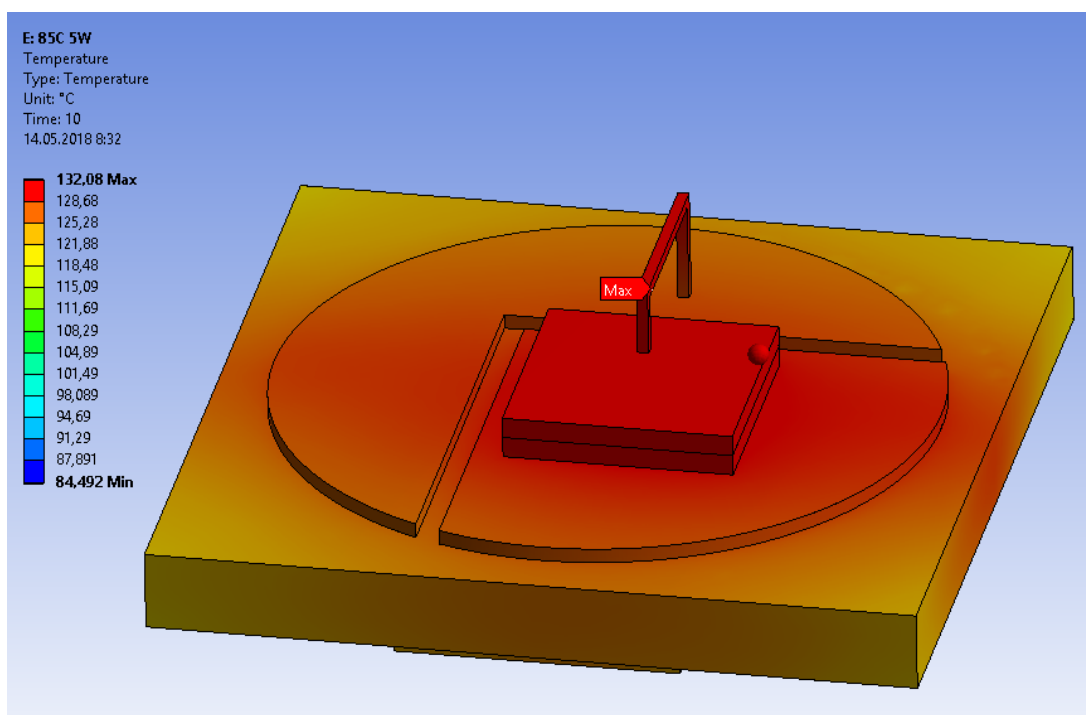


Obrázek 54 Graf oteplení LED diody při příkonu 7 W

Příkon LED 3 W, 5 W a 7 W při teplotě okolí 22°C a 85°C



Obrázek 55 Graf oteplení LED diody



Obrázek 56 Výsledné oteplení jedné LED diody (5 W, 85°C)

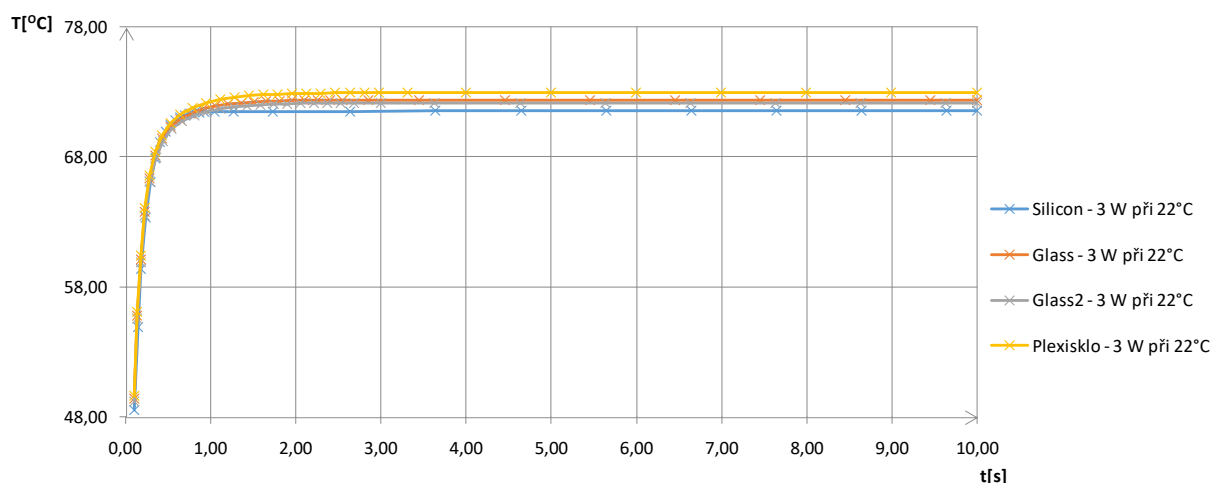
Z výsledků simulace je vidět, že největšího oteplení je dosaženo při teplotě okolí 85°C a příkonu 7 W. Oteplení se ustálilo na 135,05°C. Tato teplota se nachází na drátku, který spojuje polovodič typu P a měděný tři čtvrtě kruh. Podle datasheetu je nejvyšší dovolená teplota LED diody 125°C, avšak teplota PN přechodu může být až 150°C. Ze získaných výsledků vidíme, že by sice teplota přechodu vyhovovala, ale provozní teplota celé LED diody je vyšší, než je dovoleno, a proto by mohlo dojít k postupné degradaci celé LED diody. Z datasheetu vidíme, že udávaný ztrátový výkon pro LED diodu Power Z5 – M2 je 5,22 W. Opět, když vezmeme tu nejhorší variantu a to teplotu okolí 85°C (tato teplota je v okolí motoru reálná), tak při příkonu 5

W dosahuje oteplení hodnoty 132,08°C. Další věc, kterou musíme zahrnout do měření, je fakt, že měříme LED diodu bez chladiče, která je uprostřed vytvořeného vzdušného boxu, tedy celou LED diodu obklopuje vzduch. Tato skutečnost v reálu nenastane, vždy je alespoň z jedné strany něčím obklopena. Proto nám i výsledné oteplení vychází nižší, než by ve skutečnosti bylo. O tom se následně přesvědčíme, že to opravdu tak je.

Řešením, abychom docílili snížení oteplení LED diody, je navrhnout vhodný chladič. V další simulaci vyzkoušíme, jaký bude mít vliv změna materiálu čočky LED diody na celkové oteplení.

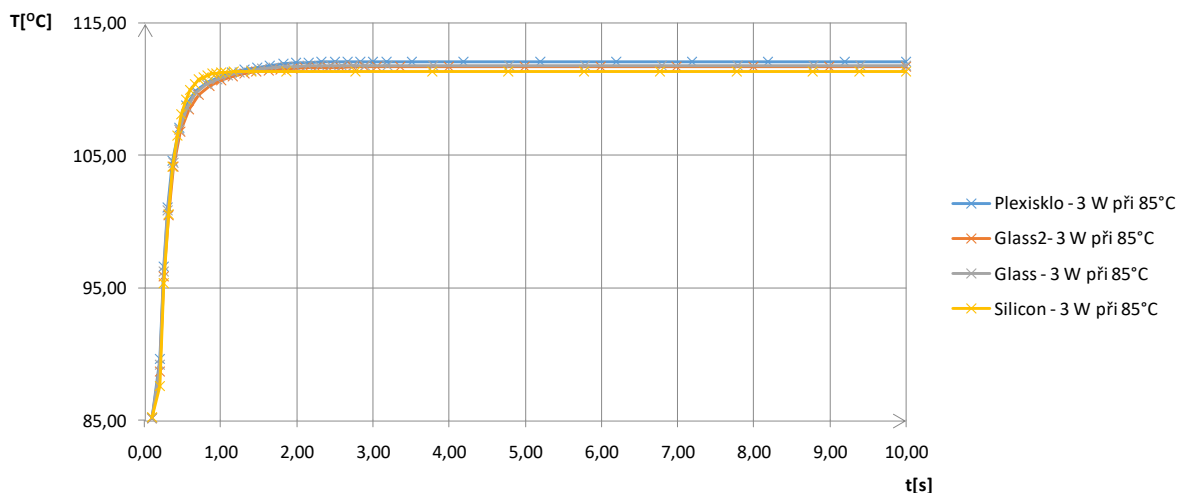
4.2.2 Výsledky simulace jedné LED diody při různých materiálech čočky LED diody

Vliv různým materiálu čočky LED na celkové oteplení při teplotě okolí 22°C



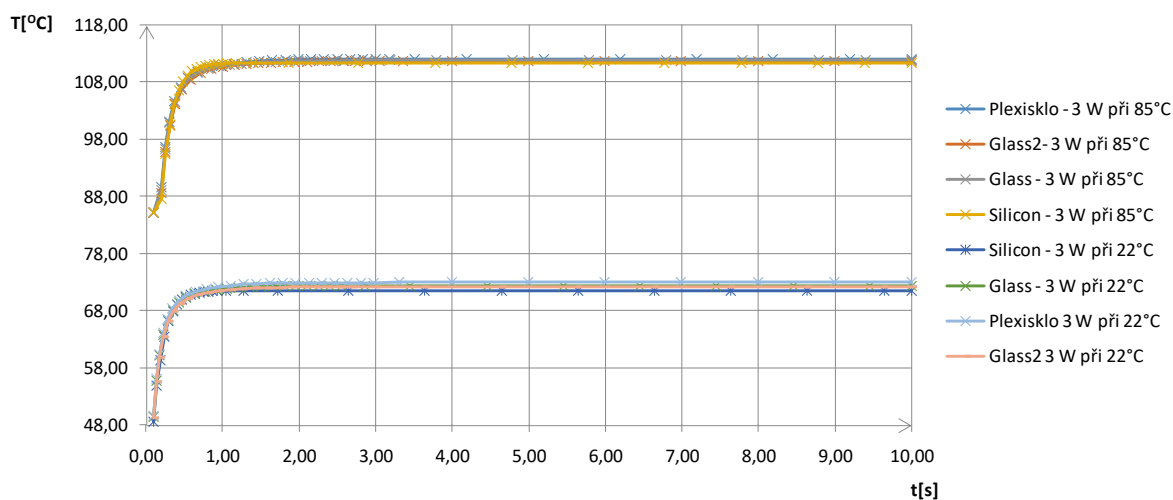
Obrázek 57 Graf oteplení LED diody v závislosti na materiálu čočky při teplotě okolí 22°C

Vliv různým materiálu čočky LED na celkové oteplení při teplotě okolí 85°C

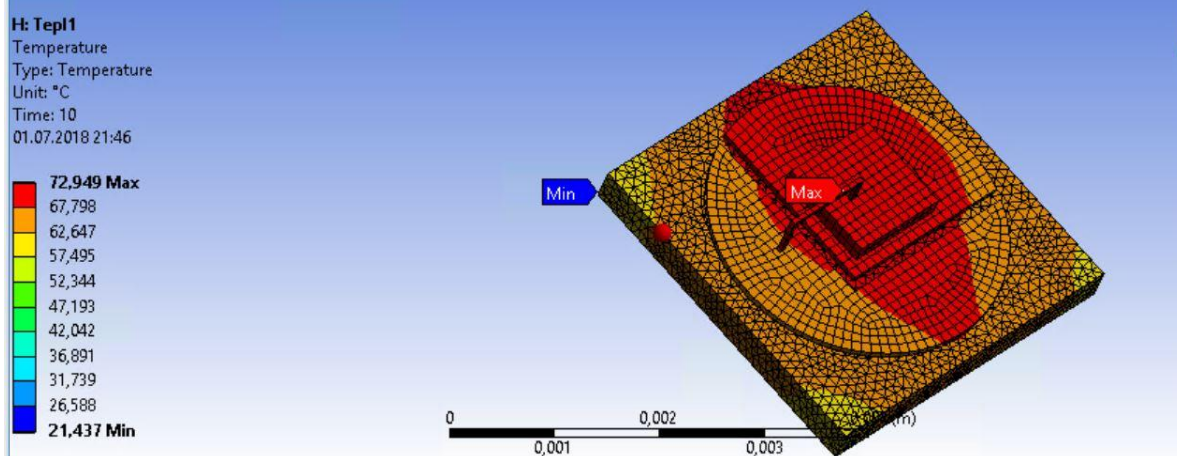


Obrázek 58 Graf oteplení LED diody v závislosti na materiálu čočky při teplotě okolí 85°C

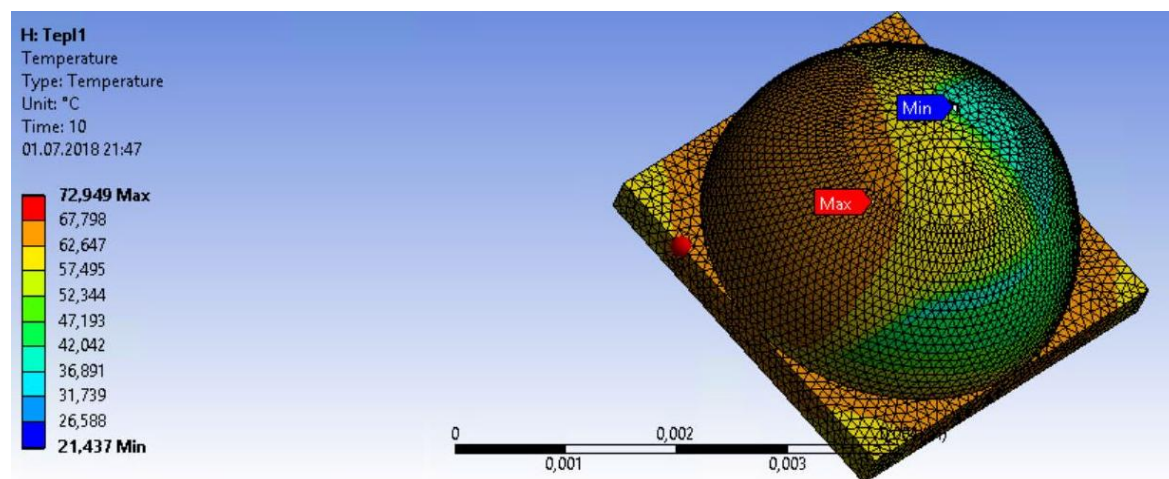
Vliv různým materiálu čočky LED na celkové oteplení při teplotě okolí 22°C a 85°C



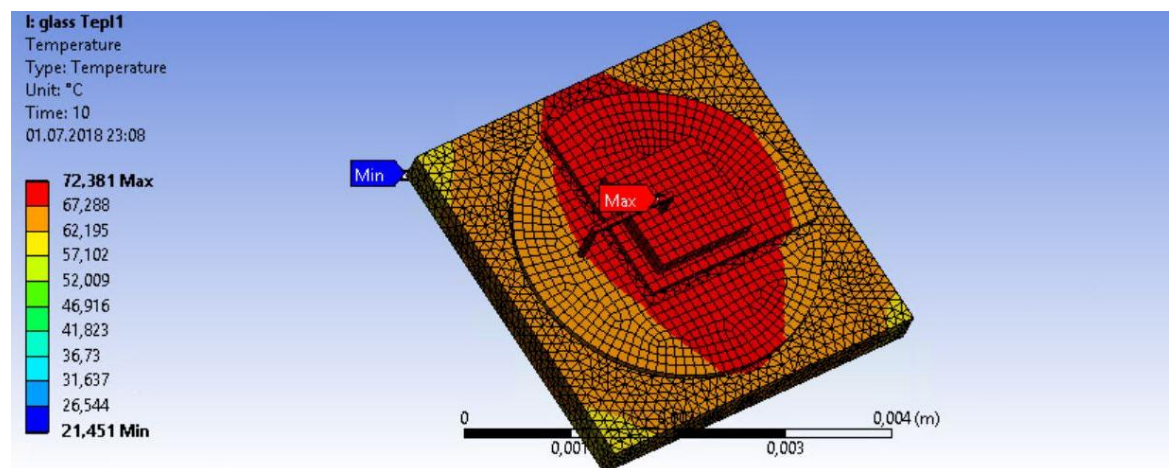
Obrázek 59 Graf oteplení LED diody v závislosti na materiálu čočky při teplotě okolí 22°C a 85°C



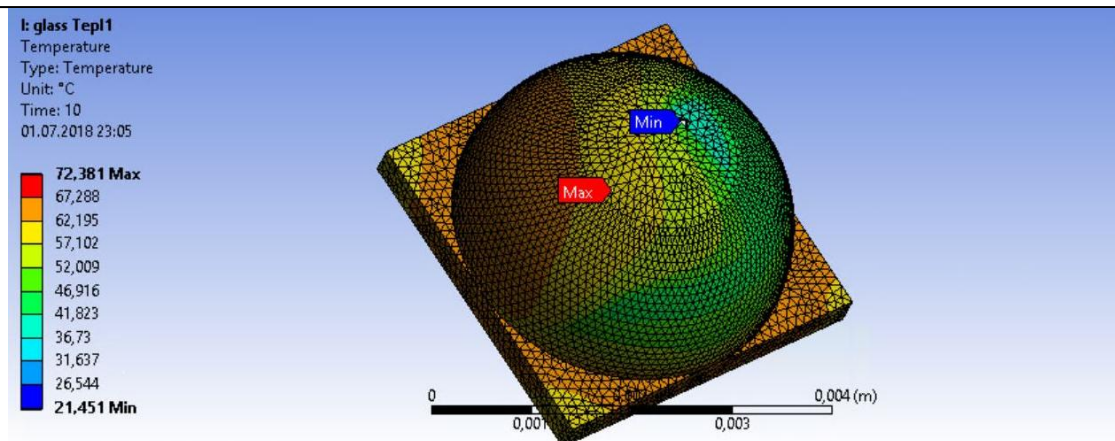
Obrázek 60 Teplotní síť při použitém materiálu čočky – plexisklo (uvnitř LED diody)



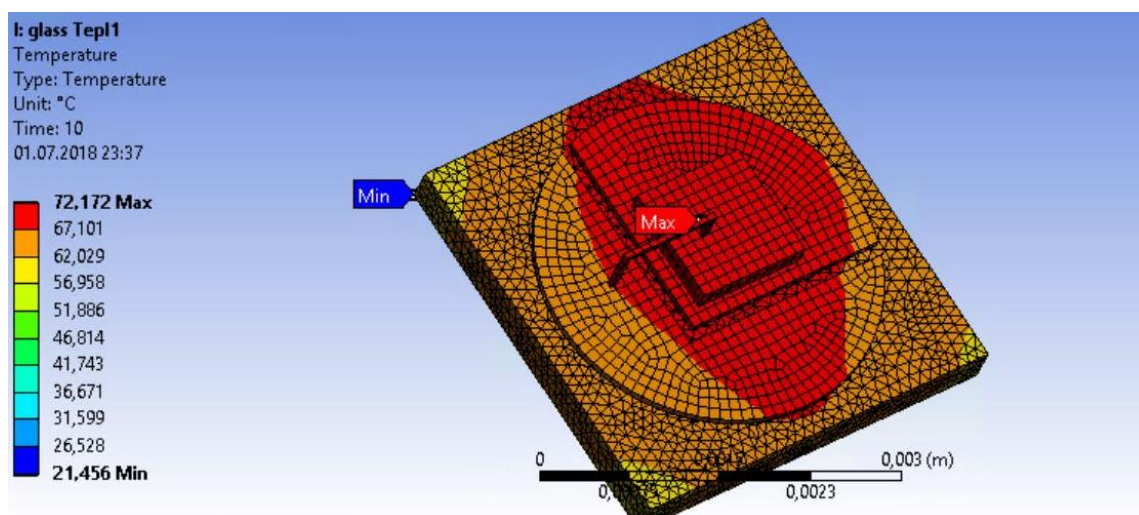
Obrázek 61 Teplotní síť při použitém materiálu čočky – plexisklo



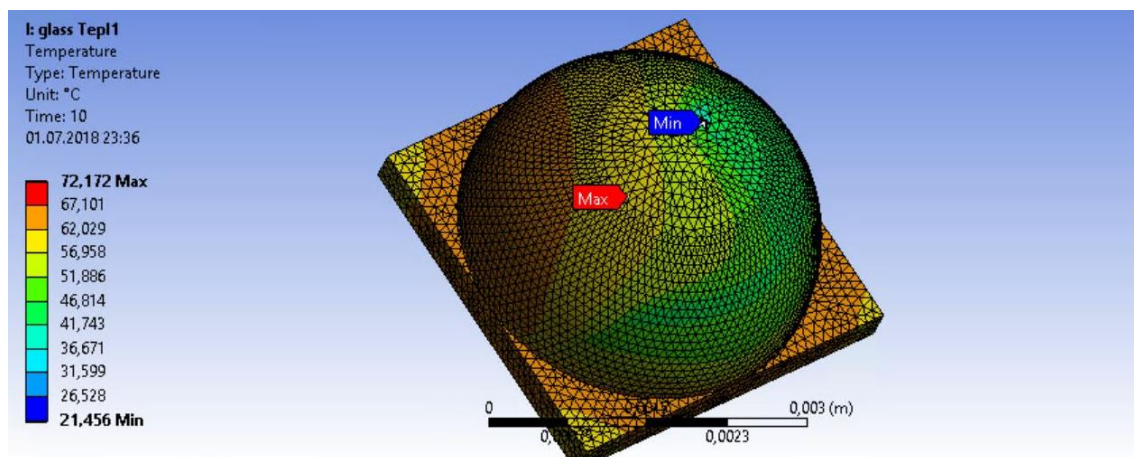
Obrázek 62 Teplotní síť při použitém materiálu čočky – sklo (uvnitř LED diody)



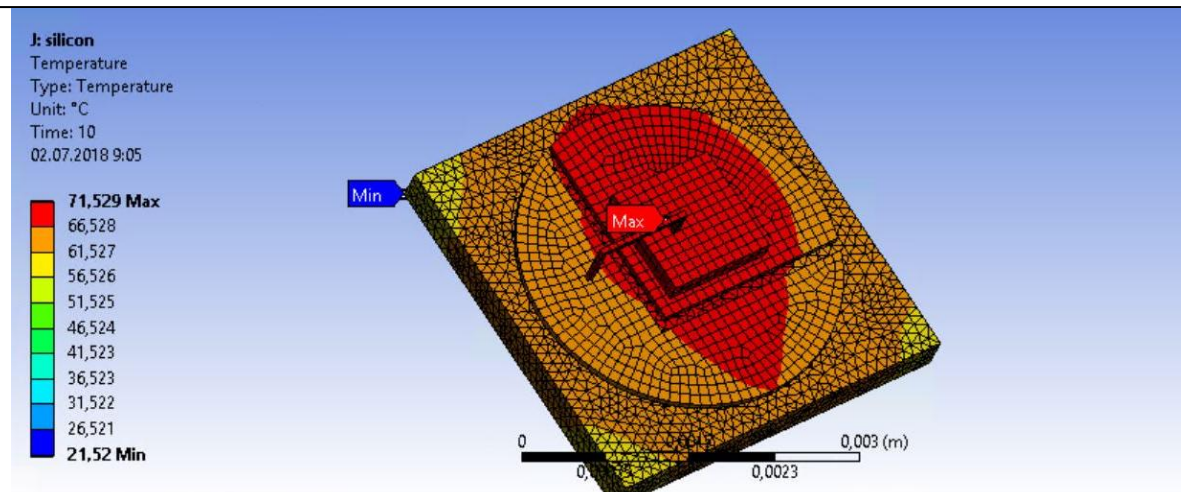
Obrázek 63 Teplotní síť při použitím materiálu čočky – sklo



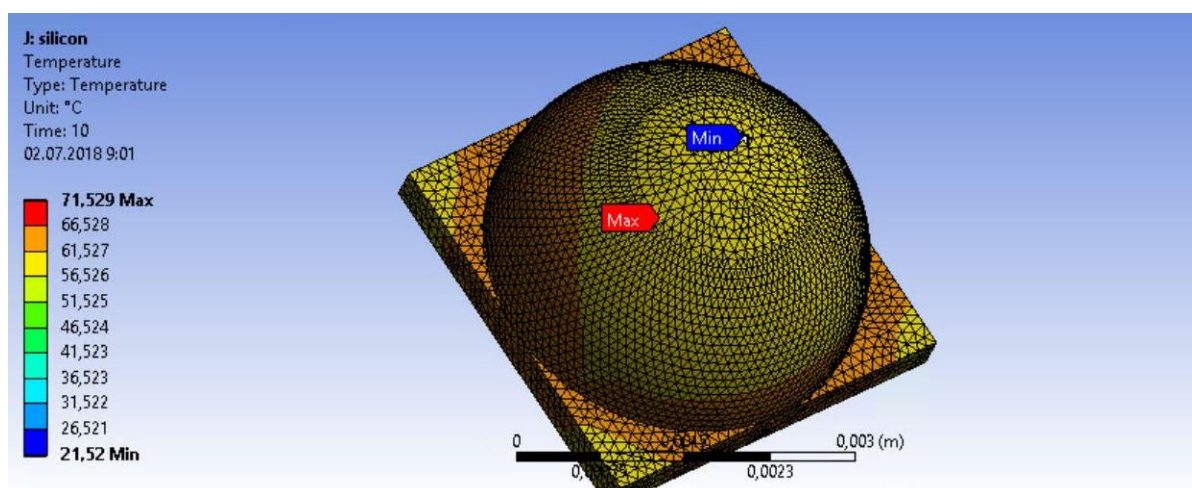
Obrázek 64 Teplotní síť při použitím materiálu čočky – sklo 2 (uvnitř LED diody)



Obrázek 65 Teplotní síť při použitím materiálu čočky – sklo 2



Obrázek 66 Teplotní síť při použitém materiálu čočky – křemík (uvnitř LED diody)



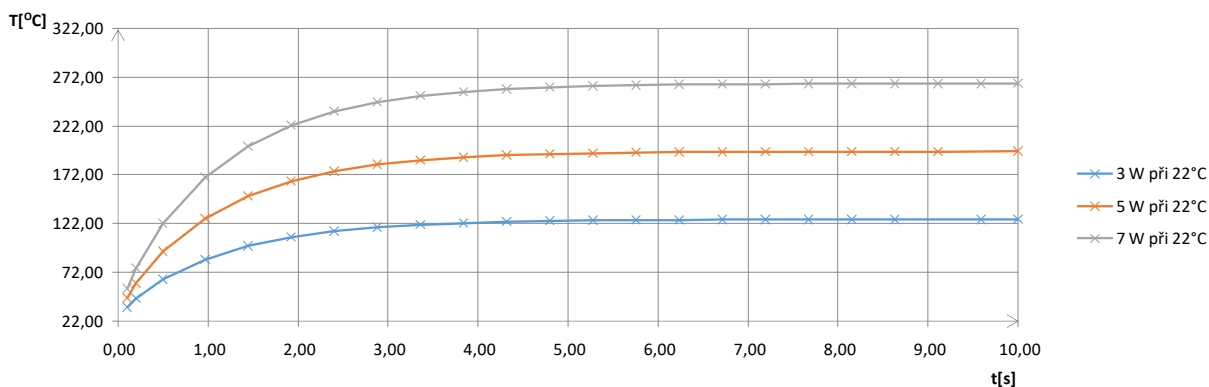
Obrázek 67 Teplotní síť při použitém materiálu čočky – křemík

Z těchto výsledků simulací je vidět, že výsledné oteplení LED diody se až zas tak nemění, když budeme měnit materiál čočky LED diody. Největší rozdíl oteplení byl 1,42°C mezi použitým materiálem plexiskla a křemíku.

V následující simulaci provedeme výpočet oteplení jedné LED diody, která je připevněna na jednoduchý chladič bez žebrování. Chladič je vyrobený z hliníku.

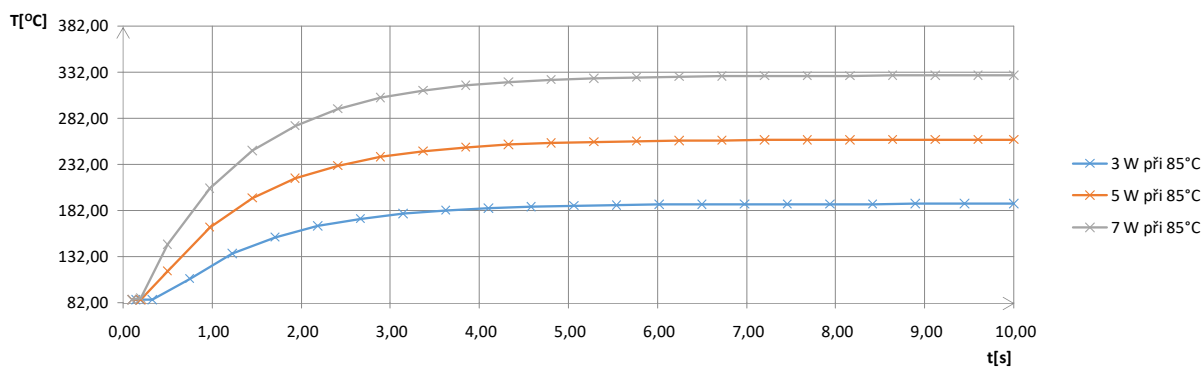
4.2.3 Výsledek simulace jedné LED diody připevněné na chladiči

Příkon LED 3 W, 5 W a 7 W při teplotě okolí 22°C



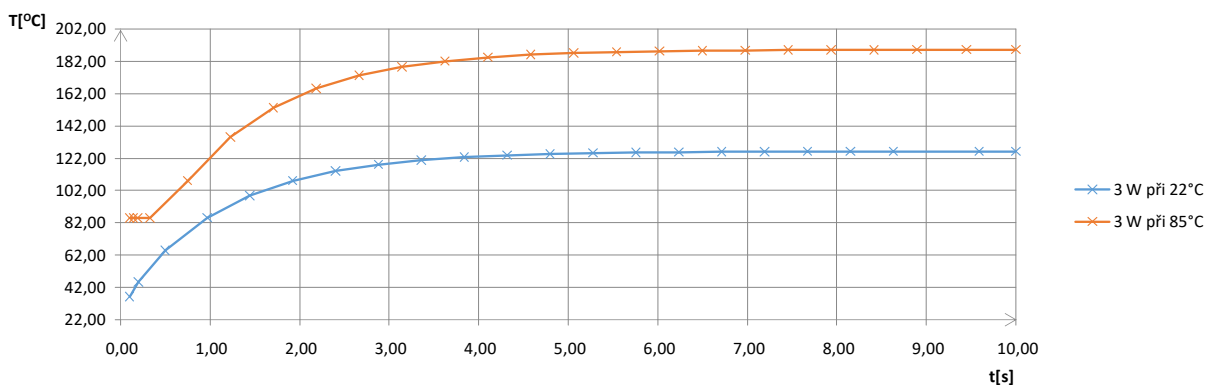
Obrázek 68 Graf oteplení LED diody připevněné na chladiči při různém příkonu, teplota okolí 22°C

Příkon LED 3 W, 5 W a 7 W při teplotě okolí 85°C



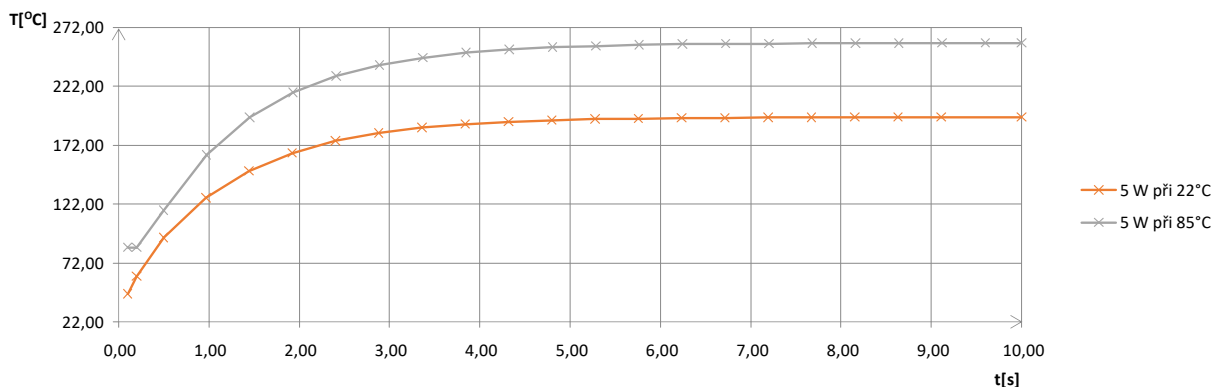
Obrázek 69 Graf oteplení LED diody připevněné na chladiči při různém příkonu, teplota okolí 85°C

Příkon LED 3 W při teplotě okolí 22°C a 85°C



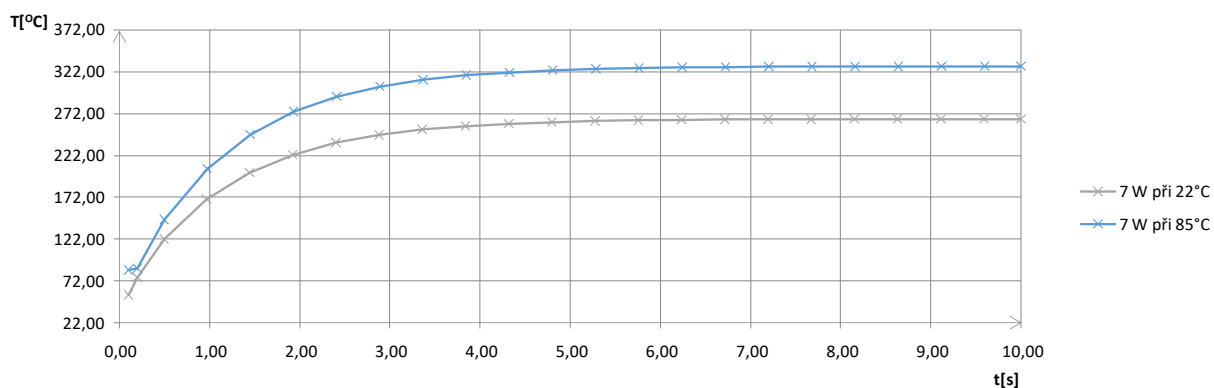
Obrázek 70 Graf oteplení LED diody na chladiči při příkonu 3 W

Příkon LED 5 W při teplotě okolí 22°C a 85°C



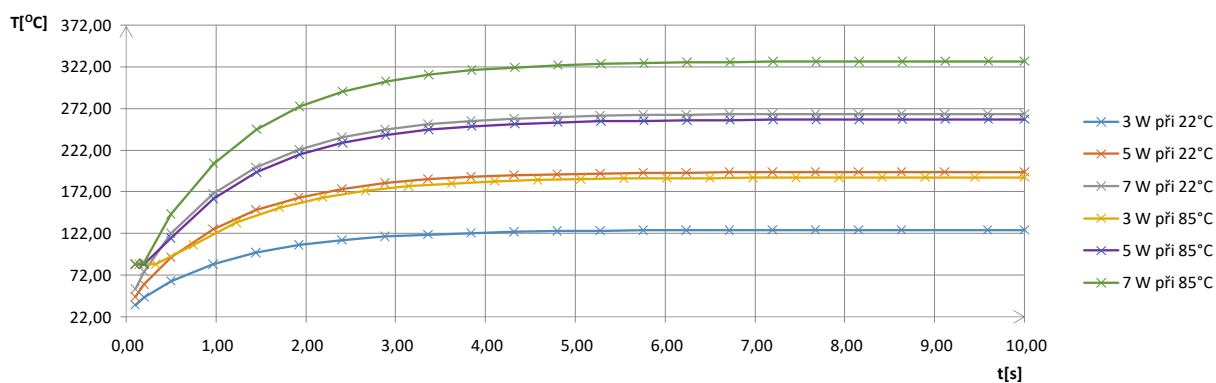
Obrázek 71 Graf oteplení LED diody na chladiči při příkonu 5 W

Příkon LED 7 W při teplotě okolí 22°C a 85°C

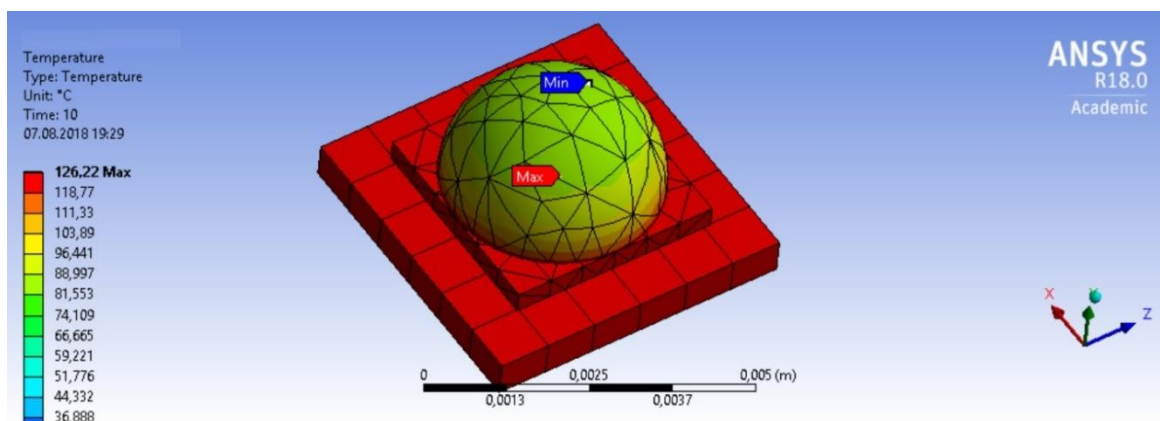


Obrázek 72 Graf oteplení LED diody na chladiči při příkonu 7 W

Příkon LED 3 W, 5 W a 7 W při teplotě okolí 22°C a 85°C



Obrázek 73 Graf oteplení LED diody na chladiči

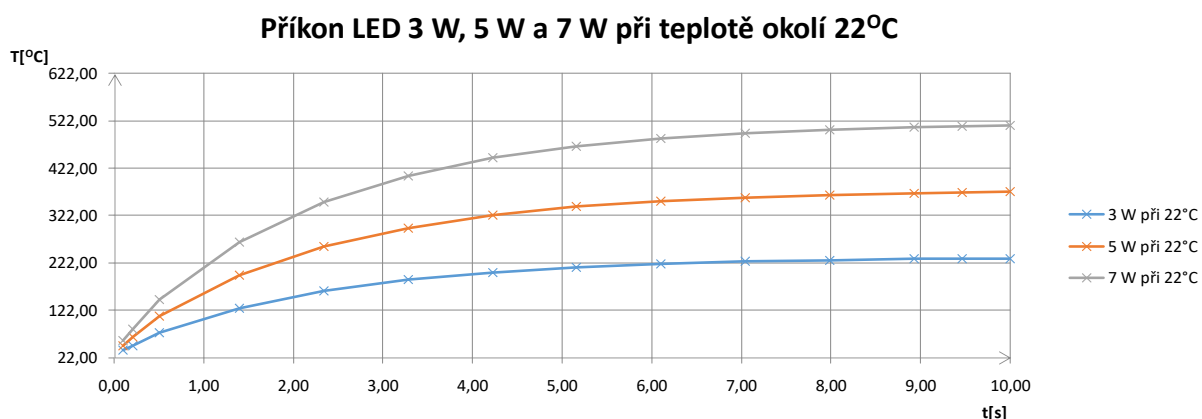


Obrázek 74 LED dioda Power Z5 - M2 3W s chladičem, teplota okolí 22°C

Z výsledků je vidět, že po přidělení chladiče na LED diodu se oteplení zvedlo o 77,58°C. Důvodem je to, že LED diodu už neobklopuje vzduch ze všech stran a nedochází k tak dobrému odvodu tepla. Řešením tohoto problému je navrhnout chladič, který dokáže udržet oteplení LED diody v přípustných hodnotách. Při tomto návrhu chladiče by LED dioda mohla být provozována na příkon 3 W, ale teplota okolí by musela být jen 22°C. Zde by celkové oteplení dosáhlo hodnoty 126,22°C, což už nepatrně překračuje horní hranici provozní teploty LED diody.

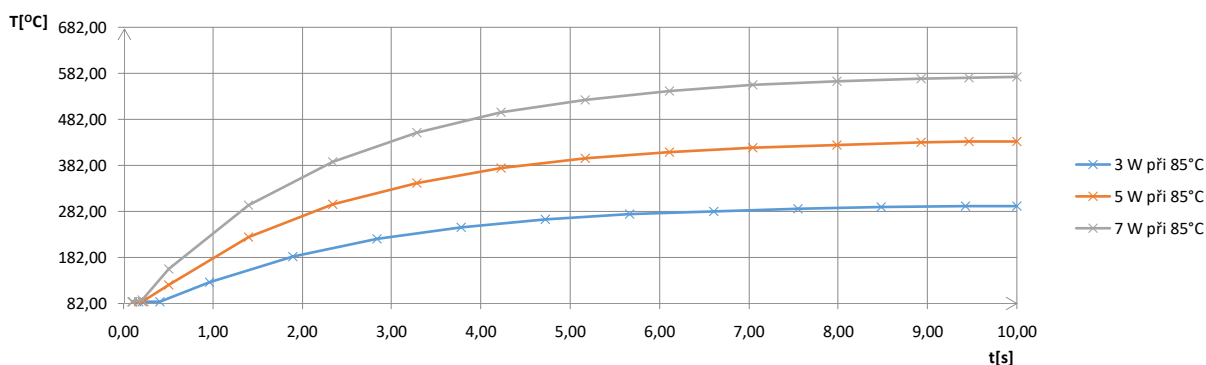
V následujícím měření budeme porovnávat pět LED diod na chladiči, které jsou blízko u sebe a pět LED diod na chladiči, které jsou dále od sebe. Budeme porovnávat jejich výsledné oteplení.

4.2.4 Výsledek simulace pěti LED diod, které jsou u sebe na chladiči



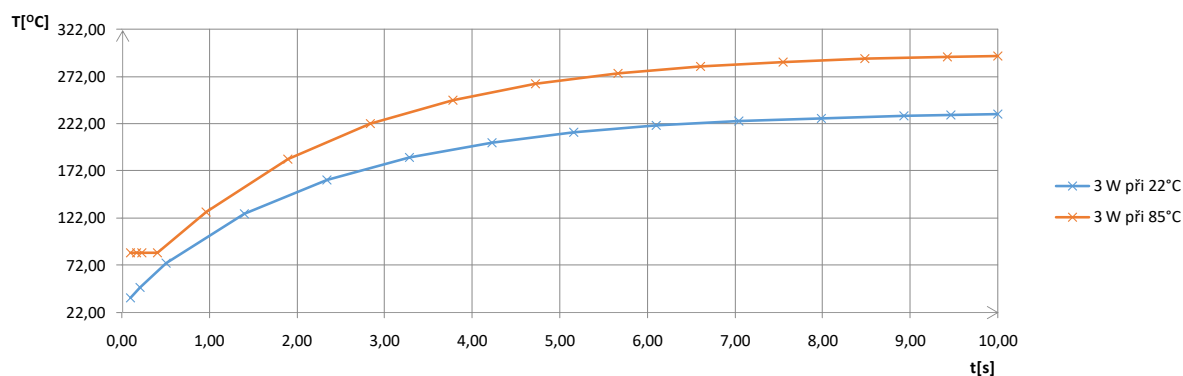
Obrázek 75 Graf oteplení 5 × LED diody připevněné na chladiči (světelné paprsky se překrývají) při různém příkonu, teplota okolí 22°C

Příkon LED 3 W, 5 W a 7 W při teplotě okolí 85°C



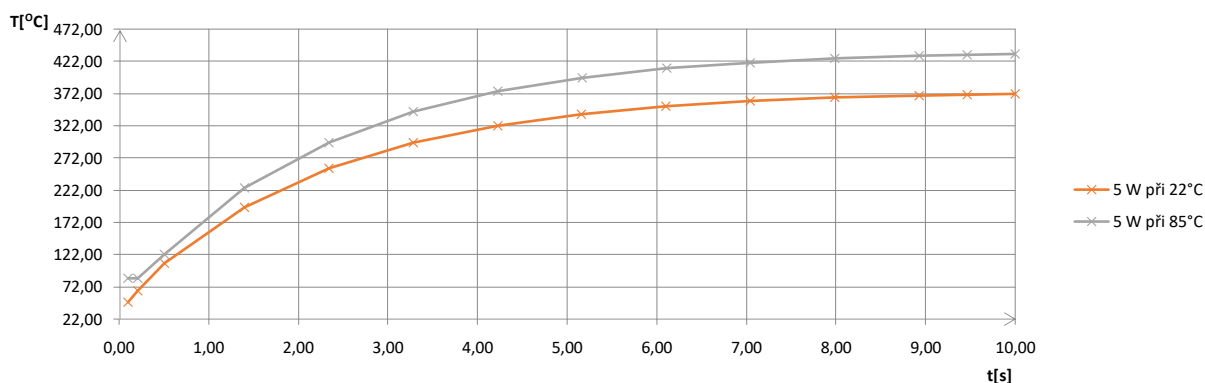
Obrázek 76 Graf oteplení 5 × LED diody na chladiči (světelné paprsky se překrývají) při různém příkonu, teplota okolí 85°C

Příkon LED 3 W při teplotě okolí 22°C a 85°C



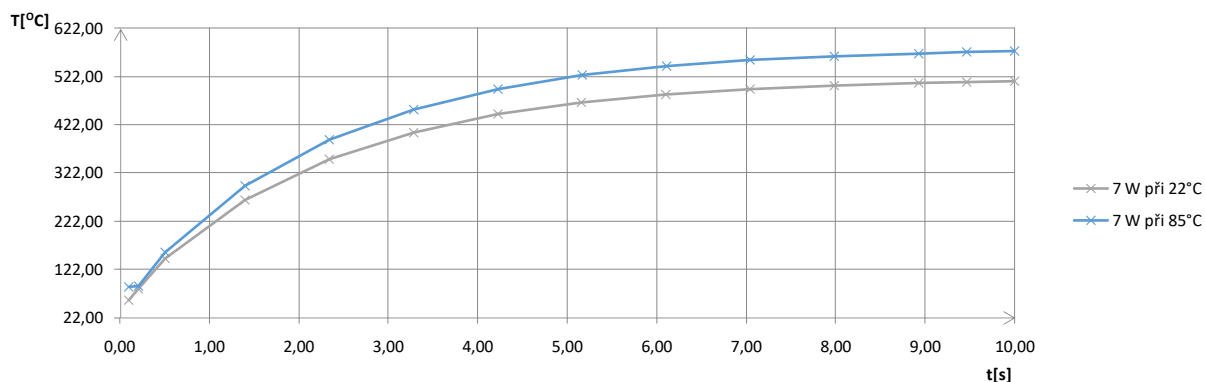
Obrázek 77 Graf oteplení 5 × LED diody na chladiči (světelné paprsky se překrývají) při příkonu 3 W

Příkon LED 5 W při teplotě okolí 22°C a 85°C



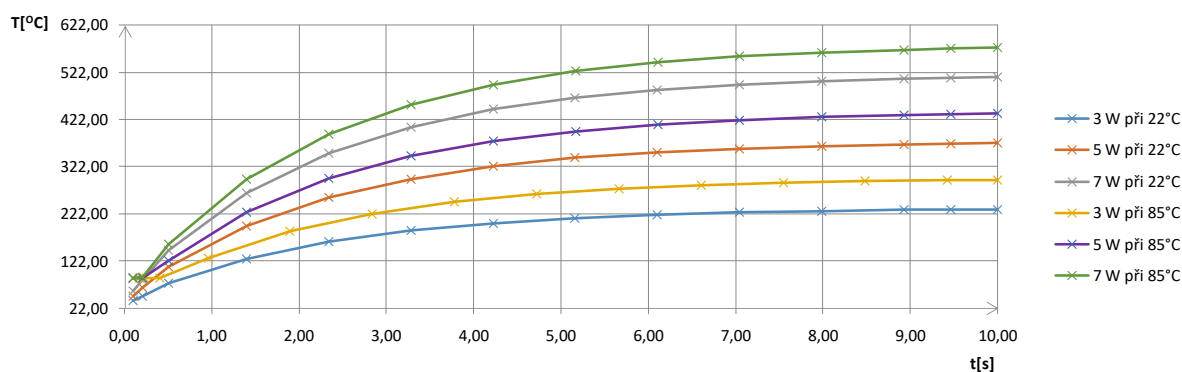
Obrázek 78 Graf oteplení 5 × LED diody na chladiči (světelné paprsky se překrývají) při příkonu 5 W

Příkon LED 7 W při teplotě okolí 22°C a 85°C

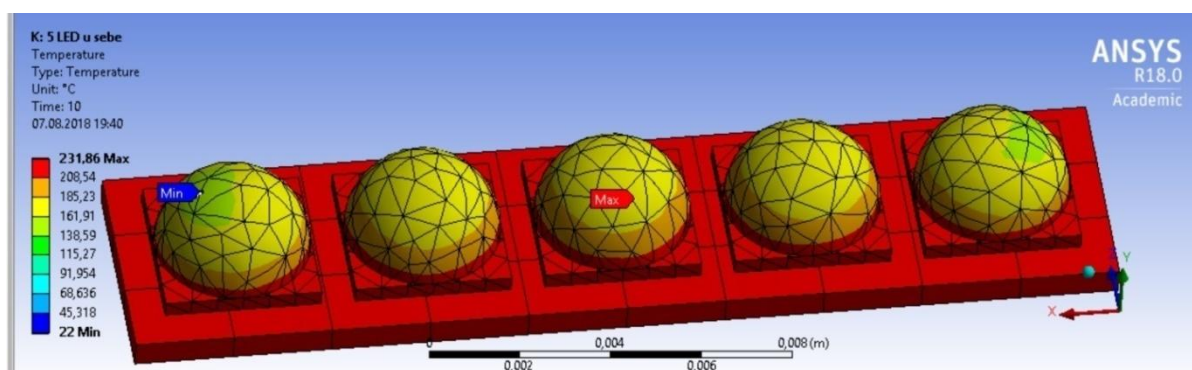


Obrázek 79 Graf oteplení 5 × LED diody na chladiči (světelné paprsky se překrývají) při příkonu 7 W

Příkon LED 3 W, 5 W a 7 W při teplotě okolí 22°C a 85°C



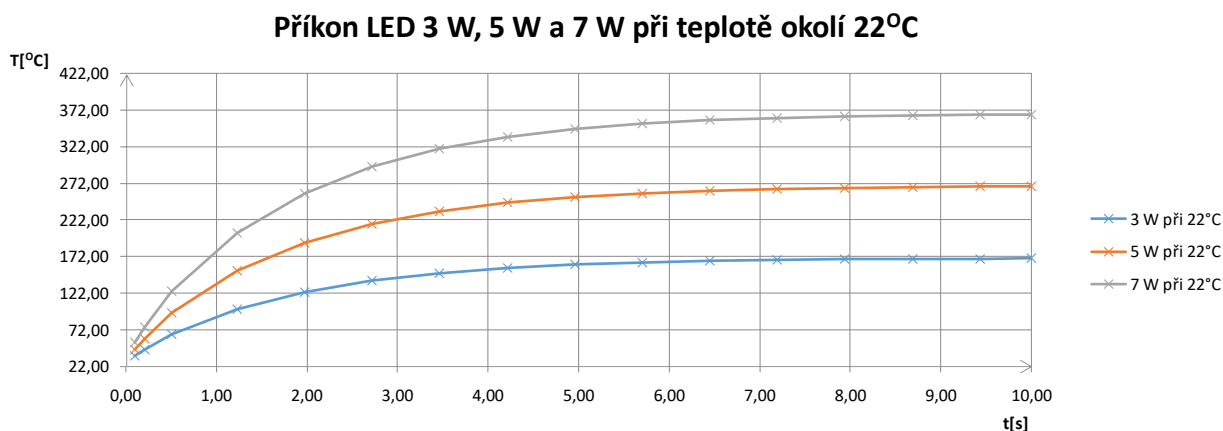
Obrázek 80 Graf oteplení 5 × LED diody na chladiči (světelné paprsky se překrývají)



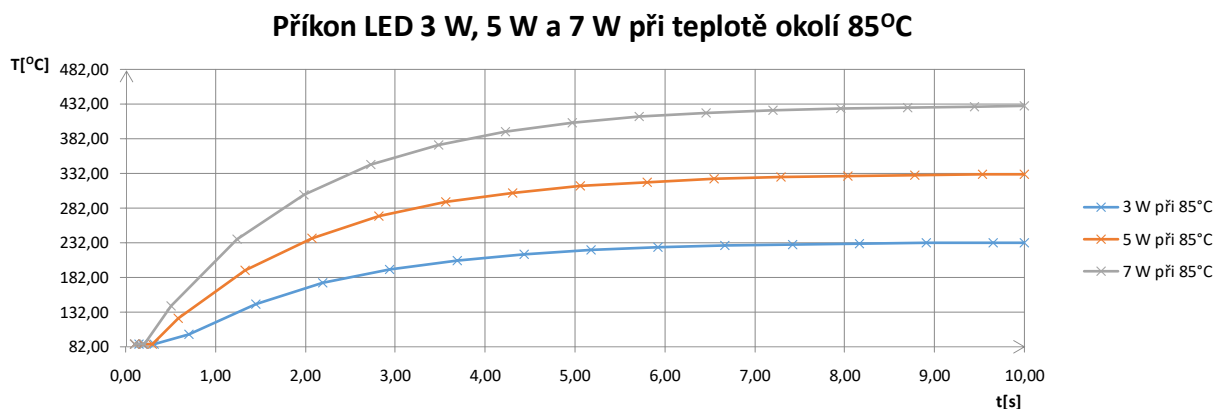
Obrázek 81 5 × LED dioda Power Z5 – M2 3 W u sebe s chladičem

Z výsledků simulace můžeme vidět, že se nejvíce zahřívá prostřední LED dioda. Je to z důvodu, že z každé strany má další LED diody, které také vyzařují do okolí teplo. Ze získaných hodnot vidíme, že použitý chladič nedokáže všech pět LED diod uchládit. Při příkonu 3 W a teplotě okolí 22°C je maximální teplota LED diody 231,86°C a naproti tomu kdyby nastaly nejhorsí podmínky (příkon 7 W a teplota okolí 85°C), je maximální teplota LED diody 574,57°C.

4.2.5 Pět LED diod dál od sebe na chladiči

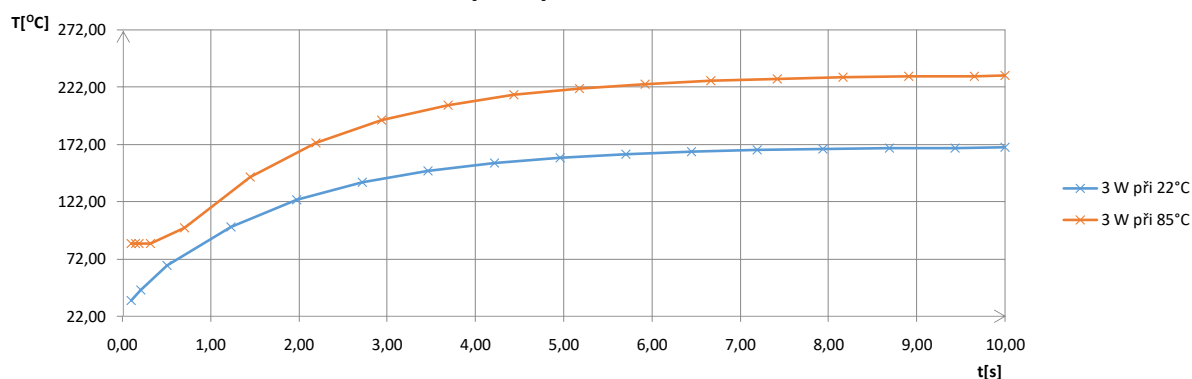


Obrázek 82 Graf oteplení 5× LED diody připevněné na chladiči (světelné paprsky se nepřekrývají) při různém příkonu, teplota okolí 22°C



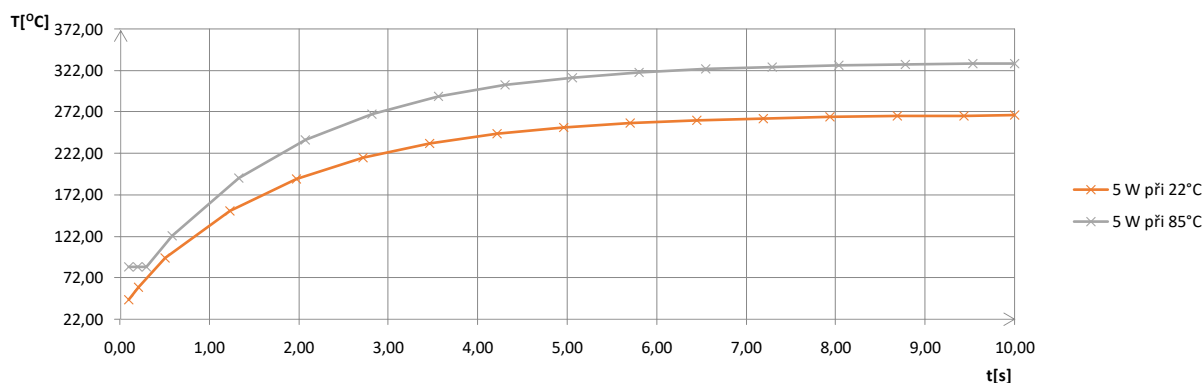
Obrázek 83 Graf oteplení 5× LED diody připevněné na chladiči (světelné paprsky se nepřekrývají) při různém příkonu, teplota okolí 85°C

Příkon LED 3 W při teplotě okolí 22°C a 85°C



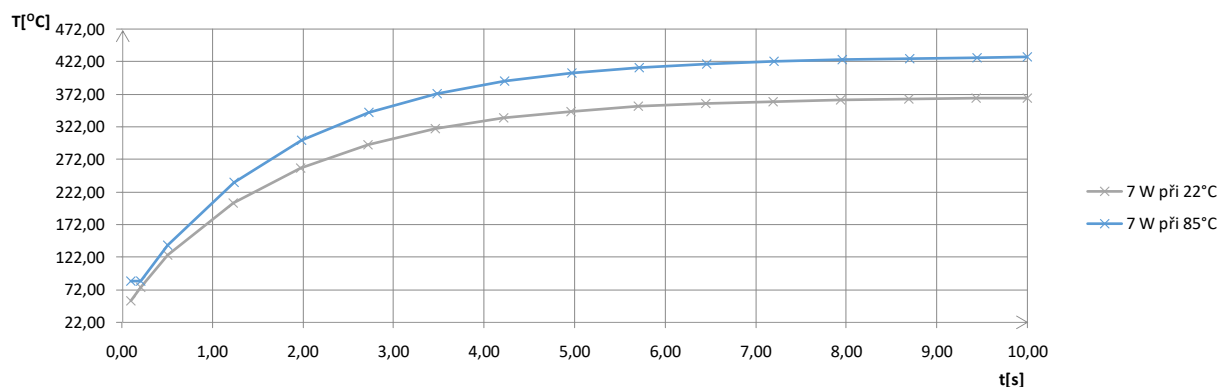
Obrázek 84 Graf oteplení 5 × LED diody na chladiči (světelné paprsky se nepřekrývají) při příkonu 3 W

Příkon LED 5 W při teplotě okolí 22°C a 85°C

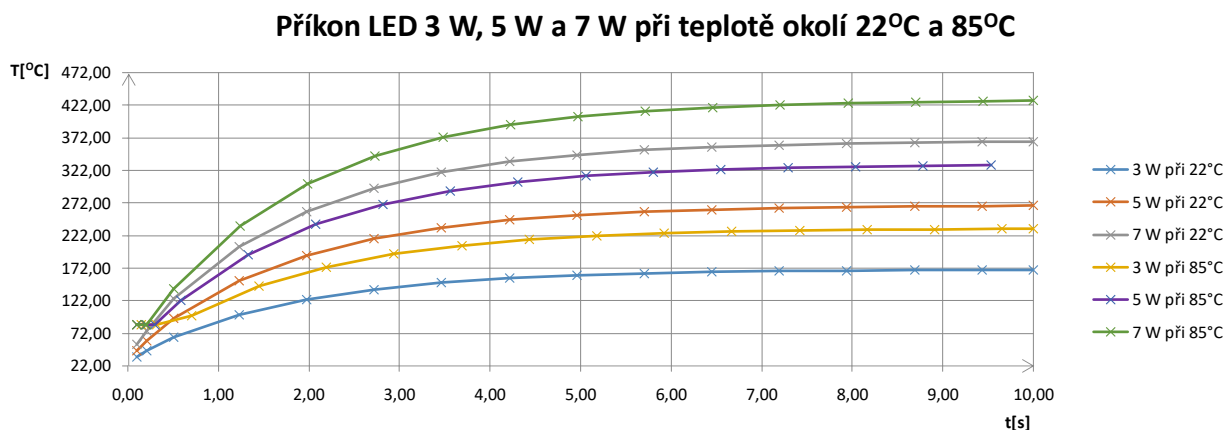


Obrázek 85 Graf oteplení 5 × LED diody na chladiči (světelné paprsky se nepřekrývají) při příkonu 5 W

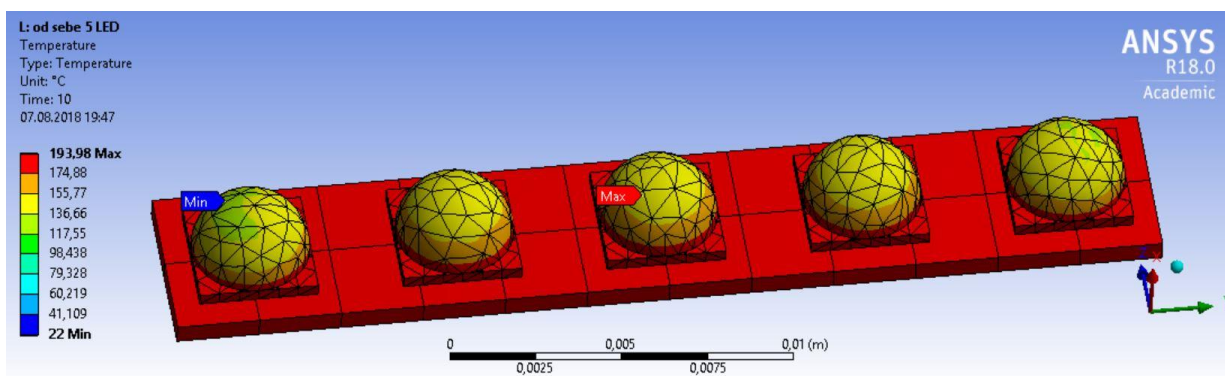
Příkon LED 7 W při teplotě okolí 22°C a 85°C



Obrázek 86 Graf oteplení 5 × LED diody na chladiči (světelné paprsky se nepřekrývají) při příkonu 7 W



Obrázek 87 Graf oteplení 5 × LED diody na chladiči (světelné paprsky se nepřekrývají)



Obrázek 88 5 × LED dioda Power Z5 – M2 3 W od sebe s chladičem

Z výsledků poslední simulace můžeme vidět, že rozložení LED diod má vliv na celkové oteplení modelu. Když jsou LED diody blíže u sebe, oteplení je vyšší a naopak, když LED diody jsou dál od sebe, celkové oteplení je nižší. Vliv na nižší oteplení má i to, že chladič, kde jsou LED diody dál od sebe, má větší plochu než chladič, kde jsou LED diody blízko u sebe. Nejvyšší oteplení je 429,07°C. Toto oteplení je o 145,5°C nižší než u LED diod, které jsou blízko u sebe.

Nejnižší oteplení je 169,36°C při teplotě okolí 22°C a příkonu 3 W. Toto oteplení je o 62,5°C nižší než u LED diod, které jsou blízko u sebe. Zde je vidět, že i nejnižší oteplení překračuje provozní teplotu LED diody. Avšak cílem této simulace bylo zjistit vliv rozmístění LED diod na chladiči. Pro dosažení oteplení, které nepřekročí dovolenou teplotu, bychom museli upravit chladič takto:

- zvýšením koeficientu přestupu tepla,
- zvětšení efektivní plochy chladiče S ,
- redukováním tloušťky chladiče d ,
- výběrem materiálu s vysokou vodivostí.

ZÁVĚR

Cílem této diplomové práce bylo vytvořit přehled používaných zdrojů světla v dnešních moderních světlotemtech. Během vývoje, a hlavně z důvodu kladení vysokých nároků na kvalitu a spolehlivost, se z těchto zdrojů stávají velmi složitá a sofistikovaná zařízení. Za pár desetiletí se vystřídaly čtyři druhy světelných zdrojů, z nichž v poslední době je nejdokonalejší LED zdroj. Tyto LED světelné zdroje postupně nahrazují xenonové výbojky. S rostoucím požadavkem na výkon roste i potřeba chlazení LED zdroje, což přináší jisté problémy, které je potřeba řešit. Jedná se o zajištění optimálního teplotního prostředí pro všechny požadované součásti LED diody a zajistit tak správnou funkčnost celého světlotetu. Aby LED dioda měla dlouhou životnost, musí být zajištěné kvalitní chlazení, aby nedocházelo k nadměrnému zahřívání. S rozvojem moderní technologie jsou v dnešní době velkým pomocníkem simulační programy, které dokážou optimalizovat nejrůznější parametry a odhalit případné chyby.

Dále byly v práci popsány materiály, které se používají ve zdrojích světla, zvláště pak v LED. Následně jsme pak vytvořili zjednodušený 3D model LED diody Power Z5 – M2 v programu Autodesk Inventor. Rozměry této LED diody nám poskytla firma Automotive Lighting.

Pro simulaci teplotních vlastností LED zdroje jsme použili metodu konečných prvků. S touto metodou počítá i program Ansys Workbench, který jsme použili pro veškeré výpočty. Provádění těchto výpočtů bylo časově velmi náročné.

Výpočty oteplení LED zdroje jsme prováděli pro příkony 3 W, 5 W a 7 W na LED diodě a teplotu okolí jsme volili 22°C a 85°C. Nejprve jsme proměřili samotnou LED diodu bez přítomnosti chladiče. Z výsledku simulace jsme zjistili maximální oteplení, které bylo na měděném drátku, co spojoval polovodič typu P a měděný tři čtvrtě kruh. Podle datasheetu je ztrátový výkon LED diody 5,22W. Pro teplotu okolí 85°C a příkon 5W je teplota LED diody 132,08°C. Tato hodnota překračuje dovolené oteplení. Zde musíme ještě uvést fakt, že LED diodu obklopuje ze všech stran vzduch (LED dioda se nachází v boxu, ve kterém je vzduch). To má za následek nižší celkové oteplení LED zdroje. V dalším kroku jsme proměřili, jaký bude mít vliv změna materiálu čochy LED diody. Jako materiály jsme použili sklo1, sklo2, plexisklo a křemík. Výsledky oteplení byly téměř totožné. Dále jsme vypočítali oteplení pro jednu LED diodu, která je připevněna na chladiči. Oteplení pro 5 W a teplotu okolí 85°C nám vyšlo 258,86°C. Na závěr práce jsme vypočetli oteplení pro dva modely, které obsahovaly pětici LED diod. Jeden model měl LED diody blízko u sebe a druhý dál od sebe. Výsledkem bylo, že LED diody, které byly na chladiči umístěny dál od sebe, tak jejich celkové oteplení bylo nižší než u LED diod, které byly blízko u sebe. Rozdíl oteplení pro příkon 5 W a teplotu okolí 85°C byl 103,72°C. Výsledná hodnota (pro první model příkon 5 W a teplotu okolí 85°C je 434,32°C a pro druhý model 330,6°C) opět převyšuje dovolenou provozní teplotu, která je 125°C. Řešením by bylo navrhnout sofistikovanější chladič, ale návrh chladiče nebyl bodem řešení této diplomové práce.

Ze získaných simulací je vidět, jak se mění oteplení LED diody, když měníme různé vlastnosti. Tohoto se dá pak využít pro ideální návrh LED diody a následné dokonalé chlazení celého LED zdroje.

LITERATURA

- [1] ŠŤASTNÝ, J. a B. REMEK. Autoelektrika a autoelektronika. 6. vydání. Praha: T. Malina nakladatelství, 2003. ISBN 808629302.
- [2] DVORÁČEK, Ing. Vladimír. Světelné zdroje - obyčejné žárovky. Světelné zdroje [online]. 2008, 1(4), 2 [cit. 2018-04-23]. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/res/pdf/37590.pdf>
- [3] PAVELEK, Milan a Eva JANOTKOVÁ. Vizualizační a optické měřicí metody: Termovizní systémy [online]. Brno, 2001 [cit. 2017-02-13]. Dostupné z: <http://ottp.fme.vutbr.cz/skripta/vlab/optika/0700.htm>
- [4] Centrum termografie: Přehled aplikací [online]. Praha, 2017 [cit. 2017-02-13]. Dostupné z: <http://centrumtermografie.cz/prehled-aplikaci-termografie/>
- [5] Jak se chladí počítače [online]. [cit. 2018-05-12]. Dostupné z: <https://www.zive.cz/clanky/jak-se-chladi-pocitace/pasty-vodivost-vykon-ventilatory/sc-3-a-161623-ch-79288/default.aspx>
- [6] Laserové diody 2 - Typy a struktury laserových diod [online]. [cit. 2018-05-12]. Dostupné z: <http://www.elektrorevue.cz/clanky/01043/index.html>
- [7] Co je vyzařovací úhel světla LED žárovky [online]. [cit. 2018-05-12]. Dostupné z: <https://www.lxf.cz/co-je-uhel-svetla-led-zarovky>
- [8] Sálání a konvence [online]. [cit. 2018-05-12]. Dostupné z: <https://kamna.astranet.cz/shops/3790/private/salaniXkonv.htm>
- [9] Jak vybrat žárovku podle barvy světla? [online]. [cit. 2018-05-12]. Dostupné z: <https://www.sterixretro.cz/novinky/jak-vybrat-zarovku-podle-barvy-svetla/>
- [10] Laserová světla možná způsobí revoluci, zatím je má Audi a BMW [online]. 14.květen 2014 [cit. 2018-05-12]. Dostupné z: <https://www.novinky.cz/auto/336104-laserova-svetla-mozna-zpusobi-revoluci-zatim-je-ma-audi-a-bmw.html>
- [11] Conduction in Non-Metals. [online]. [cit. 2018-02-23]. Dostupné z: <http://www.gcse.com/energy/conduction.htm>
- [12] Konvekce. [online]. [cit. 2018-03-01]. Dostupné z: http://help.solidworks.com/2011/Czech/SolidWorks/cworks/LegacyHelp/Simulation/AnalysisBackground/ThermalAnalysis/Convection_Topics/IDH_Analysis_Background_Convection.html
- [13] Princip bezdotykového měření teploty [online]. [cit. 2018-05-12]. Dostupné z: <http://www.qtest.cz/bezdotykove-teplomery/bezdotykove-mereni-teploty.htm>
- [14] Reading Between the Thermal Lines - New Dielectric Materials for LED-Packages [online]. [cit. 2018-05-12]. Dostupné z: <https://www.mentor.com/products/mechanical/engineering-edge/volume4/issue2/reading-between-thermal-line-new-dielectric-led-packages>
- [15] LED stropní panel rastrový. Luxprim Lighting professionals [online]. [cit. 2018-07-08]. Dostupné z: <https://luxprim.cz/interierova-svitidla/stropni-led-panely/895-led-stropni-panel-rastrovy-600x600mm-40w-studena-bila-ra-90.html>

-
- [16] Jak se vyrábí žárovka, která svítí řidičům už 40 let a přežije i xenony. Technet.cz [online]. [cit. 2018-07-08]. Dostupné z: https://technet.idnes.cz/vyroba-zarovky-0g7-/tec/technika.aspx?c=A130807_151747_tec_technika_rja
- [17] Voltampérová charakteristika žárovky. Vzdálená internetová laboratoř [online]. [cit. 2018-07-08]. Dostupné z: <http://remote-lab.fyzika.net/experiment/07/experiment-7-teorie.php?lng=cs>
- [18] Tungsten-Halogen Incandescent lamps. Zeiss [online]. [cit. 2018-07-01]. Dostupné z: <http://zeiss-campus.magnet.fsu.edu/articles/lightsources/tungstenhalogen.html>
- [19] Žárovky a halogenové žárovky. Elkovo Čepelík [online]. [cit. 2018-07-08]. Dostupné z: <http://www.elkovo-cepelik.cz/zarovky-a-halogenove-zarovky>
- [20] Obrázek - halogenová žárovka. Vaseautodoplnky.cz [online]. [cit. 2018-05-04]. Dostupné z: <https://www.vaseautodoplnky.cz/halogenova-zarovka-h7-12v-premium-55w-px26d-box--compass-08700/>
- [21] DVOŘÁČEK, Vladimír. Světelné zdroje – halogenové žárovky. *Světlo* [online]. 2008(5) [cit. 2018-01-02]. ISSN 1212-0812. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/svetlo/casopis/tema/svetelne-zdrojehalogenove-zarovky--15892>
- [22] Osvětlení automobilu [online]. Brno, 2013 [cit. 2018-07-08]. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=64553. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně.
- [23] KADLEC, Karel a Miloš KMÍNEK. Měřicí a řídicí technika: Měření teploty [online]. In: . Praha, 2005 [cit. 2018-01-01]. Dostupné z: <http://uprt.vscht.cz/kminekm/mrt/F4/F4-ram.htm>
- [24] Dotykové teploměry [online]. In: . [cit. 2018-06-08]. Dostupné z: <http://www.e-pristroje.cz/teplomery-dotykov.html>
- [25] Zobrazovací technologie blízké budoucnosti. Tv freak [online]. [cit. 2018-06-08]. Dostupné z: <https://www.tvfreak.cz/zobrazovaci-technologie-blizke-budoucnosti/4670>
- [26] Seoul Semiconductor [online]. [cit. 2018-04-08]. Dostupné z: http://www.seoulsemicon.com/upload2/Z5M2_Rev6.0.pdf
- [27] Teplotní vlastnosti automobilových zdrojů světla – Halogenové zdroje [online]. Brno, 2017 [cit. 2018-08-09]. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=148309. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně.
- [28] Vše o LED. [online]. [cit. 2018-07-29]. Dostupné z: <http://www.ledmoduly.cz/vse-o-led.html>

PŘÍLOHY

Naměřené hodnoty jedné LED diody, (bez chladiče)

22°C 3 W		
Čas	min T[°C]	max T[°C]
0,10	21,84	36,54
0,14	21,80	39,93
0,18	21,77	42,24
0,23	21,75	44,19
0,28	21,74	45,55
0,35	21,73	46,51
0,42	21,72	47,18
0,51	21,72	47,64
0,62	21,72	47,96
0,73	21,71	48,17
0,85	21,71	48,32
0,97	21,71	48,42
1,09	21,71	48,50
1,21	21,71	48,54
1,34	21,71	48,57
1,46	21,71	48,60
1,58	21,71	48,61
1,71	21,71	48,62
1,83	21,71	48,63
1,95	21,71	48,63
2,20	21,71	48,64
2,70	21,71	48,64
3,68	21,71	48,64
4,68	21,71	48,64
5,68	21,71	48,64
6,68	21,71	48,64
7,68	21,71	48,64
8,68	21,71	48,64
9,34	21,71	48,64
10,00	21,71	48,64

22°C 5 W		
Čas	min T[°C]	max T[°C]
0,10	21,72	47,70
0,14	21,65	53,69
0,18	21,60	57,78
0,23	21,56	61,21
0,28	21,53	63,63
0,35	21,52	65,32
0,42	21,51	66,50
0,51	21,50	67,32
0,62	21,50	67,89
0,73	21,49	68,26
0,85	21,49	68,52
0,97	21,49	68,70
1,09	21,49	68,83
1,21	21,49	68,91
1,34	21,49	68,96
1,46	21,49	69,00
1,58	21,49	69,03
1,71	21,49	69,05
1,83	21,49	69,06
1,95	21,49	69,07
2,08	21,49	69,07
2,32	21,49	69,08
2,82	21,49	69,08
3,81	21,49	69,08
4,81	21,49	69,08
5,81	21,49	69,08
6,81	21,49	69,08
7,81	21,49	69,08
8,81	21,49	69,08
9,40	21,49	69,08
10,00	21,49	69,08

Tabulka 4 Naměřené hodnoty pro příkon 3 W a 5 W a teplotu okolí 22°C

85°C 3 W		
Čas	min T[°C]	max T[°C]
0,10	84,84	99,54
0,14	84,80	102,93
0,18	84,77	105,24
0,23	84,75	107,19
0,28	84,74	108,55
0,35	84,73	109,51
0,42	84,72	110,18
0,51	84,72	110,64
0,62	84,72	110,96
0,73	84,71	111,17
0,85	84,71	111,32
0,97	84,71	111,42
1,09	84,71	111,50
1,21	84,71	111,54
1,34	84,71	111,57
1,46	84,71	111,60
1,58	84,71	111,61
1,71	84,71	111,62
1,83	84,71	111,63
1,95	84,71	111,63
2,20	84,71	111,64
2,70	84,71	111,64
3,68	84,71	111,64
4,68	84,71	111,64
5,68	84,71	111,64
6,68	84,71	111,64
7,68	84,71	111,64
8,68	84,71	111,64
9,34	84,71	111,64
10,00	84,71	111,64

85°C 5 W		
Čas	min T[°C]	max T[°C]
0,10	84,72	110,70
0,14	84,65	116,69
0,18	84,60	120,78
0,23	84,56	124,21
0,28	84,53	126,63
0,35	84,52	128,32
0,42	84,51	129,50
0,51	84,50	130,32
0,62	84,50	130,89
0,73	84,49	131,26
0,85	84,49	131,52
0,97	84,49	131,70
1,09	84,49	131,83
1,21	84,49	131,91
1,34	84,49	131,96
1,46	84,49	132,00
1,58	84,49	132,03
1,71	84,49	132,05
1,83	84,49	132,06
1,95	84,49	132,07
2,08	84,49	132,07
2,32	84,49	132,08
2,82	84,49	132,08
3,81	84,49	132,08
4,81	84,49	132,08
5,81	84,49	132,08
6,81	84,49	132,08
7,81	84,49	132,08
8,81	84,49	132,08
9,40	84,49	132,08
10,00	84,49	132,08

Tabulka 5 Naměřené hodnoty pro příkon 3 W a 5 W a teplotu okolí 85°C

22°C 7 W			85°C 7 W		
Čas	min T[°C]	max T[°C]	Čas	min T[°C]	max T[°C]
0,10	21,70	49,32	0,10	84,70	112,32
0,14	21,63	55,69	0,14	84,63	118,69
0,18	21,57	60,03	0,18	84,57	123,03
0,23	21,53	63,68	0,23	84,53	126,68
0,28	21,50	66,25	0,28	84,50	129,25
0,35	21,49	68,05	0,35	84,49	131,05
0,42	21,48	69,31	0,42	84,48	132,31
0,51	21,47	70,18	0,51	84,47	133,18
0,62	21,47	70,78	0,62	84,47	133,78
0,73	21,46	71,17	0,73	84,46	134,17
0,85	21,46	71,45	0,85	84,46	134,45
0,97	21,46	71,64	0,97	84,46	134,64
1,09	21,46	71,78	1,09	84,46	134,78
1,21	21,46	71,86	1,21	84,46	134,86
1,34	21,46	71,92	1,34	84,46	134,92
1,46	21,46	71,97	1,46	84,46	134,97
1,58	21,46	71,99	1,58	84,46	134,99
1,71	21,46	72,01	1,71	84,46	135,01
1,83	21,46	72,03	1,83	84,46	135,02
1,95	21,46	72,03	1,95	84,46	135,03
2,08	21,46	72,04	2,08	84,46	135,04
2,32	21,46	72,04	2,32	84,46	135,04
2,82	21,46	72,05	2,82	84,46	135,05
3,81	21,46	72,05	3,81	84,46	135,05
4,81	21,46	72,05	4,81	84,46	135,05
5,81	21,46	72,05	5,81	84,46	135,05
6,81	21,46	72,05	6,81	84,46	135,05
7,81	21,46	72,05	7,81	84,46	135,05
8,81	21,46	72,05	8,81	84,46	135,05
9,40	21,46	72,05	9,40	84,46	135,05
10,00	21,46	72,05	10,00	84,46	135,05

Tabulka 6 Naměřené hodnoty pro příkon 7 W a teplotu okolí 22°C a 85°C

Naměřené hodnoty jedné LED diody – různé materiály čočky LED diody

silicon - 22°C 3 W	
Čas	max T[°C]
0,10	48,51
0,14	54,89
0,18	59,36
0,24	63,38
0,29	66,10
0,35	67,91
0,41	69,12
0,47	69,92
0,52	70,46
0,58	70,82
0,64	71,05
0,69	71,21
0,75	71,32
0,81	71,39
0,87	71,44
0,92	71,47
1,04	71,50
1,27	71,52
1,72	71,53
2,64	71,53
3,64	71,53
4,64	71,53
5,64	71,53
6,64	71,53
7,64	71,53
8,64	71,53
9,64	71,53
10,00	71,53

Glass - 22°C 3 W	
Čas	max T[°C]
0,10	49,42
0,14	55,80
0,18	60,14
0,23	63,78
0,28	66,35
0,35	68,15
0,43	69,42
0,52	70,32
0,64	70,94
0,77	71,37
0,91	71,68
1,06	71,90
1,21	72,06
1,35	72,17
1,50	72,24
1,65	72,29
1,80	72,32
1,95	72,34
2,10	72,35
2,25	72,36
2,40	72,37
2,55	72,37
2,85	72,38
3,45	72,38
4,45	72,38
5,45	72,38
6,45	72,38
7,45	72,38
8,45	72,38
9,45	72,38
10,00	72,38

Plexisklo - 22°C 3 W	
Čas	max T[°C]
0,10	49,66
0,14	56,06
0,18	60,43
0,22	64,05
0,28	66,60
0,34	68,40
0,42	69,69
0,52	70,62
0,64	71,28
0,79	71,79
0,94	72,17
1,11	72,43
1,28	72,60
1,44	72,72
1,61	72,79
1,78	72,84
1,95	72,88
2,12	72,90
2,29	72,92
2,46	72,93
2,63	72,94
2,80	72,94
2,97	72,94
3,31	72,95
3,99	72,95
4,99	72,95
5,99	72,95
6,99	72,95
7,99	72,95
8,99	72,95
10,00	72,95

Tabulka 7 Naměřené hodnoty pro různé materiály (křemík, sklo, plexisklo) čočky LED diody
Power Z5 – M2 při příkonu 3 W a teplotě okolí 22°C

Glass2 - 22°C 3 W		Plexisklo - 85°C 3 W		Glass2 - 85°C 3 W	
Čas	max T[°C]	Čas	max T[°C]	Čas	max T[°C]
0,10	49,23	0,10	85,17	0,10	85,16
0,14	55,56	0,20	89,63	0,20	88,66
0,18	59,87	0,25	96,58	0,25	95,85
0,23	63,53	0,30	101,08	0,31	100,48
0,29	66,13	0,37	104,62	0,38	104,20
0,35	67,96	0,45	107,08	0,47	106,77
0,44	69,25	0,55	108,76	0,58	108,49
0,54	70,16	0,67	109,85	0,71	109,60
0,67	70,78	0,82	110,53	0,85	110,28
0,81	71,20	0,98	110,94	1,00	110,69
0,96	71,49	1,14	111,25	1,16	110,98
1,11	71,70	1,31	111,48	1,31	111,18
1,27	71,85	1,48	111,68	1,47	111,32
1,42	71,96	1,65	111,82	1,63	111,44
1,58	72,03	1,82	111,92	1,78	111,52
1,74	72,08	1,99	111,99	1,94	111,58
1,90	72,11	2,16	112,03	2,10	111,62
2,05	72,13	2,32	112,06	2,26	111,65
2,21	72,14	2,49	112,08	2,41	111,67
2,37	72,15	2,66	112,09	2,57	111,68
2,53	72,16	2,83	112,10	2,73	111,69
2,68	72,16	3,00	112,11	2,89	111,69
3,00	72,17	3,17	112,11	3,04	111,70
3,63	72,17	3,51	112,12	3,36	111,70
4,63	72,17	4,19	112,12	3,99	111,70
5,63	72,17	5,19	112,12	4,99	111,71
6,63	72,17	6,19	112,12	5,99	111,71
7,63	72,17	7,19	112,12	6,99	111,71
8,63	72,17	8,19	112,12	7,99	111,71
9,63	72,17	9,19	112,12	8,99	111,71
10,00	72,17	10,00	112,12	10,00	111,71

Tabulka 8 Naměřené hodnoty pro různé materiály (sklo2, plexisklo) čočky LED diody

Power Z5 – M2 při příkonu 3 W

Glass - 85°C 3 W		silicon - 85°C 3 W	
Čas	max T[°C]	Čas	max T[°C]
0,10	85,16	0,10	85,22
0,20	89,18	0,20	87,59
0,25	96,27	0,26	95,38
0,30	100,85	0,31	100,57
0,37	104,46	0,37	104,14
0,46	106,95	0,43	106,54
0,56	108,63	0,48	108,15
0,68	109,71	0,54	109,22
0,81	110,38	0,60	109,94
0,95	110,78	0,65	110,41
1,10	111,07	0,71	110,73
1,25	111,27	0,77	110,94
1,39	111,43	0,83	111,08
1,54	111,55	0,88	111,18
1,69	111,63	0,94	111,24
1,84	111,69	1,00	111,28
1,99	111,73	1,06	111,31
2,14	111,76	1,17	111,34
2,29	111,78	1,40	111,35
2,44	111,79	1,86	111,36
2,59	111,80	2,77	111,36
2,74	111,81	3,77	111,36
2,89	111,81	4,77	111,36
3,19	111,81	5,77	111,36
3,79	111,82	6,77	111,36
4,79	111,82	7,77	111,36
5,79	111,82	8,77	111,36
6,79	111,82	9,39	111,36
7,79	111,82	10,00	111,36
8,79	111,82		
9,40	111,82		
10,00	111,82		

Tabulka 9 Naměřené hodnoty pro různé materiály (sklo, křemík) čočky LED diody

Power Z5 - M2 při příkonu 3W a teplotě okolí 85°C

Naměřené hodnoty jedné LED diody připevněné na chladiči

22°C 3 W	
Čas	max T[°C]
0,10	36,21
0,20	45,18
0,50	64,81
0,97	85,06
1,45	98,78
1,92	107,94
2,40	114,04
2,88	118,11
3,36	120,82
3,84	122,63
4,32	123,83
4,80	124,63
5,28	125,17
5,76	125,53
6,24	125,76
6,72	125,92
7,20	126,03
7,68	126,10
8,15	126,15
8,63	126,18
9,59	126,21
10,00	126,22

85°C 3 W	
Čas	max T[°C]
0,10	85,00
0,15	85,00
0,19	85,00
0,33	85,00
0,75	108,03
1,23	135,11
1,71	153,16
2,19	165,19
2,67	173,21
3,15	178,55
3,63	182,11
4,10	184,49
4,58	186,07
5,06	187,13
5,54	187,83
6,02	188,30
6,50	188,61
6,98	188,82
7,46	188,96
7,94	189,05
8,42	189,12
8,90	189,16
9,45	189,19
10,00	189,21

22°C 5 W	
Čas	max T[°C]
0,10	45,71
0,20	60,67
0,50	93,41
0,97	127,21
1,45	150,10
1,92	165,37
2,40	175,55
2,88	182,34
3,36	186,86
3,84	189,88
4,32	191,89
4,80	193,23
5,28	194,12
5,76	194,71
6,24	195,11
6,72	195,38
7,20	195,55
7,68	195,67
8,15	195,75
8,63	195,80
9,11	195,83
10,00	195,87

Tabulka 10 Naměřené hodnoty LED diody Power Z5 – M2 připevněné na chladiči

85°C 5 W		22°C 7 W		85°C 7 W	
Čas	max T[°C]	Čas	max T[°C]	Čas	max T[°C]
0,10	85,00	0,10	55,21	0,10	85,00
0,20	85,00	0,20	76,16	0,20	86,88
0,50	116,49	0,50	122,02	0,50	145,10
0,98	163,86	0,97	169,35	0,97	206,04
1,45	195,56	1,45	201,41	1,45	246,90
1,93	216,68	1,92	222,81	1,93	274,13
2,41	230,76	2,40	237,07	2,41	292,28
2,89	240,14	2,88	246,57	2,89	304,38
3,37	246,40	3,36	252,90	3,37	312,44
3,85	250,57	3,84	257,13	3,85	317,82
4,33	253,35	4,32	259,94	4,33	321,40
4,81	255,20	4,80	261,82	4,81	323,79
5,29	256,43	5,28	263,07	5,29	325,38
5,77	257,26	5,76	263,90	5,77	326,45
6,25	257,81	6,24	264,46	6,25	327,15
6,73	258,17	6,72	264,83	6,72	327,63
7,21	258,42	7,20	265,08	7,20	327,94
7,69	258,58	7,68	265,24	7,68	328,15
8,16	258,69	8,15	265,35	8,16	328,29
8,64	258,76	8,63	265,42	8,64	328,38
9,12	258,81	9,11	265,47	9,12	328,45
9,60	258,84	9,59	265,50	9,60	328,49
10,00	258,86	10,00	265,52	10,00	328,51

Tabulka 11 Naměřené hodnoty LED diody Power Z5 – M2 připevněné na chladiči

Naměřené hodnoty pěti LED diod u sebe na chladiči

22°C 5x3 W		85°C 5x3 W		22°C 5x5 W	
Čas	max T[°C]	Čas	max T[°C]	Čas	max T[°C]
0,10	37,46	0,10	85,00	0,10	47,79
0,20	48,04	0,16	85,00	0,20	65,44
0,50	74,19	0,22	85,00	0,50	109,07
1,40	126,16	0,41	85,00	1,40	195,78
2,34	162,21	0,96	127,98	2,34	255,92
3,28	186,29	1,90	184,44	3,28	296,09
4,22	202,34	2,84	222,11	4,22	322,86
5,16	213,03	3,78	247,22	5,16	340,70
6,10	220,16	4,72	263,96	6,10	352,60
7,04	224,91	5,66	275,11	7,04	360,53
7,98	228,08	6,60	282,55	7,98	365,81
8,93	230,19	7,54	287,51	8,93	369,33
9,46	231,13	8,48	290,81	9,46	370,90
10,00	231,86	9,43	293,01	10,00	372,12
		10,00	294,04		

Tabulka 12 Naměřené hodnoty 5 × LED diody Power Z5 – M2 na chladiči (světelné paprsky se překrývají – LED diody jsou blízko u sebe)

85°C 5x5 W		22°C 5x7 W		85°C 5x7 W	
Čas	max T[°C]	Čas	max T[°C]	Čas	max T[°C]
0,10	85,00	0,10	58,13	0,10	85,00
0,20	85,00	0,20	82,84	0,20	88,32
0,50	122,26	0,50	143,95	0,50	157,14
1,40	225,14	1,40	265,39	1,40	294,81
2,34	296,54	2,34	349,63	2,34	390,29
3,28	344,17	3,28	405,88	3,28	453,99
4,22	375,91	4,22	443,38	4,22	496,45
5,16	397,07	5,16	468,37	5,16	524,75
6,10	411,18	6,10	485,03	6,10	543,62
7,05	420,58	7,04	496,14	7,05	556,20
7,99	426,85	7,98	503,54	7,99	564,58
8,93	431,03	8,93	508,47	8,93	570,17
9,46	432,88	9,46	510,67	9,46	572,64
10,00	434,32	10,00	512,37	10,00	574,57

Tabulka 13 Naměřené hodnoty 5 × LED diody Power Z5 – M2 na chladiči (světelné paprsky se překrývají – LED diody jsou blízko u sebe)

Naměřené hodnoty pěti LED diod dál od sebe na chladiči

22°C 5x3 W		85°C 5x3 W		22°C 5x5 W	
Čas	max T[°C]	Čas	max T[°C]	Čas	max T[°C]
0,10	35,85	0,10	85,00	0,10	45,10
0,20	44,67	0,14	85,00	0,20	59,81
0,50	65,83	0,19	85,00	0,50	95,13
1,23	100,04	0,31	85,00	1,23	152,19
1,97	123,33	0,70	99,43	1,97	191,05
2,72	138,87	1,45	143,75	2,72	216,98
3,46	149,23	2,19	173,49	3,46	234,27
4,21	156,14	2,94	193,31	4,21	245,79
4,95	160,74	3,68	206,53	4,95	253,47
5,70	163,81	4,43	215,34	5,70	258,59
6,45	165,86	5,18	221,21	6,45	262,00
7,19	167,22	5,92	225,12	7,19	264,28
7,94	168,13	6,67	227,73	7,94	265,79
8,68	168,74	7,41	229,47	8,68	266,80
9,43	169,14	8,16	230,63	9,43	267,48
10,00	169,36	8,91	231,40	10,00	267,85
		9,65	231,92		
		10,00	232,11		

Tabulka 14 Naměřené hodnoty 5 × LED diody Power Z5 – M2 na chladiči (světelné paprsky se nepřekrývají – LED diody jsou dál od sebe)

85°C 5x 5 W		22°C 5x7 W		85°C 5x7 W	
Čas	max T[°C]	Čas	max T[°C]	Čas	max T[°C]
0,10	85,00	0,10	54,35	0,10	85,00
0,20	85,00	0,20	74,96	0,20	85,00
0,29	85,00	0,50	124,42	0,50	140,70
0,58	122,89	1,23	204,34	1,24	236,64
1,32	192,26	1,97	258,77	1,98	301,33
2,07	238,80	2,72	295,09	2,73	344,47
2,82	269,81	3,46	319,30	3,48	373,22
3,56	290,49	4,21	335,44	4,22	392,38
4,31	304,27	4,95	346,19	4,97	405,16
5,05	313,46	5,70	353,36	5,71	413,67
5,80	319,58	6,45	358,14	6,46	419,35
6,55	323,66	7,19	361,33	7,20	423,13
7,29	326,38	7,94	363,45	7,95	425,66
8,04	328,20	8,68	364,87	8,70	427,34
8,78	329,41	9,43	365,81	9,44	428,46
9,53	330,21	10,00	366,34	10,00	429,07
10,00	330,60				

Tabulka 15 16 Naměřené hodnoty $5 \times$ LED diody Power Z5 – M2 na chladiči (světelné paprsky se nepřekrývají – LED diody jsou dál od sebe)